



---

**SEMINAR NASIONAL INFRASTRUKTUR ENERGI NUKLIR**

**Yogyakarta, 25 Oktober 2018**

---

---

**PUSAT KAJIAN SISTEM ENERGI NUKLIR  
BADAN TENAGA NUKLIR NASIONAL**

# **SEM INAR**

## **NASIONAL INFRASTRUKTUR ENERGI NUKLIR**

**“Diversifikasi Sumber Energi untuk Keberlanjutan  
Penyediaan Listrik”**

Yogyakarta, 25 Oktober 2018

Kerja sama:



**Fakultas Teknik  
Universitas Mataram**



**Pusat Kajian Sistem Energi Nuklir  
Badan Tenaga Nuklir Nasional**

Didukung Oleh:



**Sekolah Tinggi Teknologi Nuklir (STTN)**

# DEWAN EDITOR

---

Sugiman, S.T., M.T., Ph.D	UNRAM
Mirmanto, S.T., M.T., Ph.D	UNRAM
Dr. Retno Gumilang Dewi	ITB
Dr. Eko Budi Lelono	LEMIGAS
Dra. Heni Susiati, M.Si.	BATAN
Drs. Sahala Maruli Lumban Raja	BATAN
Ir. Edwaren Liun	BATAN
Ir. Erlan Dewita, M.Eng.	BATAN
Wiku Lulus Widodo, M.Eng.	BATAN
Dr. Sunarko, B.Eng., M.Si.	BATAN
Imam Bastori, S.T.	BATAN
Ir. Tagor Malem Sembiring	BATAN
Drs. Susetyo Trijoko, M.App.Sc.	BATAN
Nuryanti, M.T.	BATAN
Dra. Dharu Dewi, M.Si.	BATAN
Yuliasuti, M.Si.	BATAN

# S A M B U T A N

---

Bismillahirrohmanirrohiim,  
Yth Para Pembicara Kunci,

Yth Para Undangan dan Peserta Seminar

Assalamualaikum Wr. Wb. Selamat pagi dan salam sejahtera bagi kita semua.

Bapak Ibu hadirin sekalian. Penyiapan infrastruktur terus dilakukan untuk pemanfaatan teknologi energi nuklir dalam pemenuhan target bauran energi nasional. Energi nuklir, siap memenuhi target pangsa energi baru dan energi terbarukan yang dicanangkan dalam Kebijakan Energi Nasional (KEN, Peraturan Pemerintah No. 79 tahun 2014).

Sosialisasi dan desiminasi terus menerus dilakukan oleh BATAN agar masyarakat mengerti kekurangan dan kelebihan pemanfaatan teknologi nuklir sebagai pembangkit listrik. Kegiatan ini juga diikuti dengan jajak pendapat tentang pemanfaatan teknologi nuklir sebagai pembangkit listrik di Indonesia. Secara nasional hasil jajak pendapat menunjukkan bahwa masyarakat setuju pembangunan pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) di Indonesia.

Kesiapan infrastruktur tapak untuk lokasi pembangunan PLTN, kesiapan teknologi, dan kesiapan infrastruktur lainnya menunjukkan bahwa Indonesia siap membangun PLTN untuk memperkuat ketahanan energi nasional. Dari aspek teknis yang semacam ini kita siap untuk menyongsong energi nuklir menjadi bagian opsi utama pemenuhan energi di Indonesia.

Lalu apa yang belum siap dan perlu terus disiapkan ? Adalah dari sisi non-teknis. Yang pertama adalah bagaimana kita punya komitmen jangka panjang ? Yang kedua, bagaimana mengkomunikasikan kepada masyarakat, terutama pemangku kepentingan yang kuat menyuarakan dan mengopinikan energi nuklir sebagai solusi pemenuhan target energi baru dan energi terbarukan dalam kebijakan energi nasional, dan Yang ketiga adalah bagaimana kita membaca dan memperbanyak pemangku kepentingan yang memberikan perhatian dan mendorong energi nuklir diimplementasikan di Indonesia.

Ketiga hal inilah yang menjadi kunci utama jika ingin memperjuangkan energi nuklir menjadi opsi utama energi nuklir untuk pemenuhan bauran energi nasional.

Terkait dengan hal ini, maka BATAN dapat dikatakan berhasil jika yang menyuarakan energi nuklir adalah pemangku kepentingan lain. Akhir-akhir ini alhamdulillah telah banyak pemangku kepentingan yang menyuarakan nuklir sebagai opsi utama pemenuhan energi nuklir, sambil terus memperbaiki basis data dan informasi terkait. BATAN sebagai institusi pemerintah akan terus mempersiapkan hingga kelak siap ketika dinyatakan Go Nuclear oleh Pemerintah.

Demikian sambutan saya, dengan mengucapkan Bismillahirrahmanirrahim, Focus Group Discussion (FGD) dan Seminar Infrastruktur Energi Nuklir (SIEN) saya nyatakan dibuka.

Wassalamu'alaikum warohmatullahiwarokatuh.

Yogyakarta, 25 Oktober 2018

Prof. Dr. Djarot Sulistio Wisnubroto

# KATA PENGANTAR

---

Pusat Kajian Sistem Energi Nuklir (PKSEN) – Badan Tenaga Nuklir Nasional menyelenggarakan Seminar Nasional Infrastruktur Energi Nuklir (SIEN) tahun 2018 untuk yang pertama kalinya. Seminar ini dimaksudkan sebagai wadah tukar menukar informasi hasil kajian dan penelitian dari para akademisi, peneliti, perekayasa, pranata nuklir, pelaku industri dan pemangku kepentingan lainnya untuk meningkatkan kapasitas sumber daya manusia dalam rangka penyiapan infrastruktur PLTN di Indonesia.

Seperti diketahui, negara-negara yang akan membangun Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) untuk pertama kalinya, harus mempersiapkan berbagai infrastruktur pendukung sesuai dengan panduan yang diterbitkan oleh IAEA. Oleh karena itu, Seminar Nasional Infrastruktur Energi Nuklir (SIEN) ini sangat dibutuhkan untuk menyerap berbagai masukan dari para pemangku kepentingan agar implementasi PLTN di Indonesia dapat berjalan dengan baik.

Seminar ini merupakan kerja sama antara PKSEN-BATAN dan Fakultas Teknik, Universitas Mataram (FT-UNRAM) dan sedianya akan diselenggarakan di Mataram, NTB. Adanya gempa 7.0 SR di Lombok pada 5 Agustus 2018 lalu menyebabkan penyelenggaraan SIEN harus dipindahkan. Yogyakarta dipilih karena merupakan pusat masyarakat akademis sekaligus sebagai titik tengah antara Jakarta dan NTB.

Kejadian Gempa Lombok mendorong dicetuskannya Focus Group Discussion (FGD) untuk membahas dan mencari masukan dari pakar tentang kegiatan penyiapan infrastruktur tapak PLTN di NTB dengan mempertimbangkan kejadian gempa dan kejadian eksternal lainnya. Dengan demikian, acara ini merupakan gabungan antara FGD untuk mencari masukan dari para pakar, dan Seminar untuk saling bertukar informasi, pengetahuan & sarana publikasi.

Panitia SIEN 2018 menerima 66 makalah. Setelah melalui evaluasi oleh Dewan Editor, diputuskan seluruh makalah dapat diterima untuk dipresentasikan. Makalah yang diterima tersebut kesemuanya berasal dari 4 (empat) instansi yakni BATAN, BAPETEN, STKIP 11 April, dan Dept. Fisika ITB, dimana 50 makalah dari internal BATAN, dan 16 makalah dari eksternal.

Panitia mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada berbagai pihak yang telah membantu terselenggaranya Seminar Nasional ini, khususnya Sekolah Tinggi Teknologi Nuklir yang telah memberikan bantuan yang begitu besar demi terselenggaranya acara ini.

Yogyakarta, 25 Oktober 2018

Ketua Panitia SIEN 2018

Ir. Sriyana, MT



KEPUTUSAN  
KEPALA PUSAT KAJIAN SISTEM ENERGI NUKLIR  
BADAN TENAGA NUKLIR NASIONAL  
NOMOR: 46/SEN/V/2018

TENTANG  
PEMBENTUKAN PANITIA PELAKSANA  
SEMINAR NASIONAL INFRASTRUKTUR ENERGI NUKLIR (SIEN)  
PUSAT KAJIAN SISTEM ENERGI NUKLIR  
TAHUN 2018

KEPALA PUSAT KAJIAN SISTEM ENERGI NUKLIR

- Menimbang : a. bahwa dalam rangka tukar menukar informasi dan diskusi tentang infrastruktur dan energi nuklir, maka dipandang perlu untuk menyelenggarakan Seminar Nasional Infrastruktur Energi Nuklir (SIEN);
- b. bahwa untuk ketertiban dan kelancaran pelaksanaan Seminar tersebut dipandang perlu membentuk Panitia Pelaksana.
- Mengingat : 1. Undang-Undang Nomor 10 Tahun 1997;
2. Keputusan Presiden RI Nomor 46 Tahun 2013;
3. Peraturan Kepala BATAN Nomor 14 Tahun 2013 sebagaimana telah diubah dengan Peraturan Kepala BATAN Nomor 16 Tahun 2014;
4. Keputusan Kepala BATAN Nomor 23/KA/I/2018.

M E M U T U S K A N :

- Menetapkan : KEPUTUSAN KEPALA PUSAT KAJIAN SISTEM ENERGI NUKLIR TENTANG PEMBENTUKAN PANITIA PELAKSANA SEMINAR NASIONAL INFRASTRUKTUR ENERGI NUKLIR (SIEN) PUSAT KAJIAN SISTEM ENERGI NUKLIR TAHUN 2018.



- KESATU : Membentuk Panitia Pelaksana Seminar Nasional Infrastruktur Energi Nuklir (SIEN), yang selanjutnya disebut Panitia Pelaksana, dengan susunan seperti tersebut pada lampiran Keputusan ini.
- KEDUA : Menyelenggarakan Seminar Nasional Infrastruktur Energi Nuklir (SIEN) dengan tema "Diversifikasi Sumber Energi untuk Keberlanjutan Penyediaan Listrik" bertempat di Universitas Mataram, Nusa Tenggara Barat pada bulan September 2018.
- KETIGA : Segala biaya yang diperlukan untuk penyelenggaraan Seminar tersebut dibebankan pada dana DIPA Pusat Kajian Sistem Energi Nuklir tahun 2018.
- KEEMPAT : Panitia Pelaksana wajib membuat laporan tertulis mengenai pelaksanaan Seminar tersebut kepada Kepala Pusat Kajian Sistem Energi Nuklir.
- KELIMA : Keputusan ini berlaku terhitung pada tanggal ditetapkan, dengan ketentuan apabila dikemudian hari ternyata terdapat kesalahan/kekeliruan dalam keputusan ini akan diadakan perbaikan sebagaimana mestinya.

Ditetapkan di Jakarta  
Pada tanggal 28 Mei 2018



KEPALA PUSAT KAJIAN SISTEM ENERGI NUKLIR,

  
SUPARMAN



Lampiran  
KEPUTUSAN KEPALA PUSAT KAJIAN SISTEM ENERGI NUKLIR  
NOMOR : 46/SEN/V/2018  
TANGGAL : 28 MEI 2018

SUSUNAN  
ANGGOTA PANITIA PELAKSANA  
SEMINAR NASIONAL INFRASTRUKTUR ENERGI NUKLIR (SIEN)  
PUSAT KAJIAN SISTEM ENERGI NUKLIR  
TAHUN 2018

---

Pengarah	: 1. Ir. Suryantoro, M.T.	[BATAN]
	2. Akmaluddin, S.T., M.Sc.(Eng.),Ph.D	[UNRAM]
Penanggungjawab	: Dr. Suparman	
Ketua	: Ir. Sriyana, M.T.	[BATAN]
Wakil Ketua	: Abdullah Zainuddin, S.T., M.T.	[UNRAM]
Sekretaris	: Sufiana Solihat, S.T.	[BATAN]
Anggota	:	
Seksi-seksi		
1. Seksi Acara/Persidangan		
1. Elok Satiti Amitayani, S.Si., M.T.		[BATAN]
2. Abimanyu Bondan Wicaksono Setiaji, S.T.		[BATAN]
3. Citra Candranurani, M.T.		[BATAN]
4. Syahrul, ST, MAsc., Ph.D		[UNRAM]
5. Saharuddin, S.Sos., MH		[BAPPEDA NTB]
2. Seksi Humas		
1. Mudjiono, S.Si.		[BATAN]
2. Iswan, S.Sos., M.M.		[UNRAM]
3. Khaerus Sobri, S.T.		[Dinas ESDM NTB]
3. Seksi Konsumsi		
1. Meity Purwantini		[BATAN]
2. Ketut Suiastri, SE		[UNRAM]
4. Seksi Perlengkapan		
1. Sanuri, SE		[BATAN]
2. Ngadiono, S.Sos.		[UNRAM]
5. Seksi Dokumentasi		
Eddy Syah Putra, S.T.		[BATAN]

---



6. Seksi Transportasi
1. Imam Hamzah (BATAN)
  2. Sinarep, S.T., M.T. (UNRAM)
  3. Kaharudin (BAPPEDA)
  4. Muslim, S.T. (Dinas ESDM NTB)
7. Seksi Bendahara
- Agus Aryanto, A.Md. (BATAN)
8. Seksi Prosiding
1. Arief Tris Yuliyanto, M.T. (BATAN)
  2. Ewitha Nurulhuda, A.Md. (BATAN)
  3. Denissa Beauty Syahna, A.Md. (BATAN)
  4. Euis Ety Al Hakim, S.Si. (BATAN)
  5. Yuni Indrawati, S.Si. (BATAN)
9. Editor
1. Sugiman, S.T., M.T., Ph.D. (UNRAM)
  2. Mirmanto, S.T., M.T., Ph.D. (UNRAM)
  3. Dr. Retno Gumilang Dewi (ITB)
  4. Dr. Eko Budi Lelono (LEMIGAS)
  5. Dra. Heni Susiati, M.Si. (BATAN)
  6. Drs. Sahala Maruli Lumban Raja (BATAN)
  7. Ir. Edwaren Liun (BATAN)
  8. Ir. Erlan Dewita, M.Eng. (BATAN)
  9. Wiku Lulus Widodo, M.Eng. (BATAN)
  10. Sunarko, B.Eng., M.Si. (BATAN)
  11. Imam Bastori, S.T. (BATAN)
  12. Ir. Tagor Malem Sembiring (BATAN)
  13. Drs. Susetyo Trijoko, M.App.Sc. (BATAN)
  14. Nuryanti, M.T. (BATAN)
  15. Dra. Dharu Dewi, M.Si. (BATAN)
  16. Yuliasuti, M.Si. (BATAN)



KEPALA PUSAT KAJIAN SISTEM ENERGI NUKLIR,

SUPARMAN

# DAFTAR ISI

---

DEWAN EDITOR

SAMBUTAN

KATA PENGANTAR

SURAT KEPUTUSAN

DAFTAR ISI

## KELOMPOK A : PERENCANAAN ENERGI, FINANSIAL, KESELAMATAN DAN SEIFGARD

1. KAJIAN KEBIJAKAN STRATEGIS FOKUS BIDANG ENERGI DI BATAN 1  
Falikul Fikri, Dwi Irwanti, Sriyana
2. PROYEKSI BEBAN HARIAN SISTEM KELISTRIKAN MATARAM DENGAN 13  
MENGUNAKAN BATASAN SIMPANGAN BAKU  
Wiku Lulus Widodo, Rizki Firmansyah SB
3. STATUS TERKINI MENGENAI PEMANFAATAN PLTN DI DUNIA DAN 21  
PROSPEK PEMBANGUNANNYA DI INDONESIA  
Eri Hiswara
4. KAJIAN SISTEM KESELAMATAN REAKTOR TMSR (THORIUM MOLTEN 31  
SALT REACTOR)  
Erlan Dewita, Tagor Malem Sembiring, Sunarko
5. ANALISIS KESELAMATAN IRADIASI U-235 PENGKAYAAN RENDAH (LEU) 39  
DI CENTRAL IRRADIATION POSITION (CIP) REAKTOR RSG-GAS DENGAN  
BATAN-3DIFF  
Sutrisno, Elisabeth Ratnawati
6. PERAWATAN PREDIKTIF JARINGAN LISTRIK SIKLOTRON 47  
MENGUNAKAN THERMOGRAPPHY INFRAMERAH  
I Wayan Widiana, Parwanto, Edi Slamet Riyanto, Rajiman
7. TINJAUAN *MATERIAL ACCOUNTED FOR* (MUF) PADA DESAIN RDE 59  
Pertiwi D. W., Bening F., Hendro W.
8. KAJIAN PEMANFAATAN HTGR SEBAGAI CAPTIVE POWER DI KAWASAN 65  
INDUSTRI  
Rr. Arum Puni Rijanti, Sahala Maruli Lumbanraja
9. PROGRAM *ENERGIEWENDE* DI JERMAN DAN RENCANA PEMANFAATAN 75  
ENERGI TERBARUKAN DI INDONESIA  
Sunarko, Denissa B. S., Slamet Suryanto
10. OPTIMISASI PROTEKSI RADIASI SEBAGAI UPAYA PENGENDALIAN 85  
PAPARAN KERJA TERHADAP PEKERJA RADIASI  
Gloria Doloressa

## KELOMPOK B : LINGKUNGAN

11. KAJIAN PROBABILISTIK DAMPAK KESEHATAN AKIBAT LEPASAN 93  
RADIONUKLIDA RSG-GAS  
Sunarko, Denissa B. S., Heni Susiati, Slamet Suryanto, Arif Yuniarto
12. PROYEKSI EMISI CO<sub>2</sub> DARI SEKTOR LISTRIK DI INDONESIA 103  
Edwaren Liun, Sahala Maruli Lumbanraja, Imam Bastori, Rizki Firmansyah S.  
B.
13. KAJIAN BIAYA EKSTERNAL FASILITAS NUKLIR REAKTOR DAYA 113  
EKSPERIMENTAL AKIBAT SEBARAN EFLUEN RADIONUKLIDA DI SUNGAI  
CISADANE  
Sufiana Solihat, Abimanyu Bondan W. S.

14.	KARAKTERISTIK NILAI PEMBATAS DOSIS DENGAN METODE QUARTILISASI DOSIS MAKSIMUM Suhaedi Muhammad, Rr. Djarwanti, RPS	123
15.	IDENTIFIKASI BAHAN BERBAHAYA DAN BERACUN DALAM EVALUASI TAPAK INSTALASI NUKLIR Dedi Hermawan, Nur Siwhan	131
16.	KAJIAN FAUNA DI PROPINSI NUSA TENGGARA BARAT (NTB): STUDI KASUS RENCANA PEMBANGUNAN PLTN June Mellawati, Merri Suhartini	141
17.	PEMBANDINGAN LAJU EROSI/DEPOSISI TANAH MENGGUNAKAN MODEL KONVERSI PM DAN MBM1 DI SUB-DAS CIBERANG – LEBAK – BANTEN Nita Suhartini, Barokah Aliyanta	151
18.	PENGUKURAN BOBOT INDIKATOR KESELAMATAN RADIASI DI LINGKUNGAN PTKMR- BATAN DENGAN METODE APROKSIMASI RELATIF Suhaedi Muhammad	161
19.	KAJIAN TEKNIS BAHAYA EKSTERNAL AKIBAT ULAH MANUSIA ASPEK LEDAKAN UNTUK INSTALASI NUKLIR Nur Siwhan	173
20.	SISTEM INFORMASI LAJU PAPARAN RADIASI MENGGUNAKAN BORLAND DELPHI 7 Isti Dian Rachmawati, Muhtadan, Nurhidayat	183
21.	TINGKAT RADIOAKTIVITAS GROSS BETA DAN <sup>137</sup> Cs DALAM AIR HUJAN DI KAWASAN NUKLIR SERPONG Leli Nirwani, R. Buchari, Wahyudi, Mujiwiyono, June Mellawati	193
<b><u>KELOMPOK C : TAPAK DAN TEKNOLOGI REAKTOR</u></b>		
22.	KAJIAN PERCEPATAN TANAH DI CALON TAPAK PLTN BATAM UNTUK MENDAPATKAN TAPAK POTENSIAL Hadi Suntoko, Mudjiono, Siti Alimah, Ajat Sudrajat	201
23.	PERTIMBANGAN PARAMETER OSEANOGRAFI FISIK DAN POTENSI TSUNAMI TAHAP PRA-SURVEI DALAM PEMILIHAN TAPAK PLTN DI PROVINSI NTB Heni Susiati, Hadi Suntoko, Slamet Suryanto	209
24.	GUTENBERG-RICHTER RECURRENCE LAW ANALYSIS OF RDE SITE AT SERPONG Yuliasuti, Euis Etty A.	221
25.	ANALISIS FK BEAMFORMING UNTUK PENENTUAN ARAH BACK AZIMUTH GEMPA DI STASIUN SEISMIK RDE Yuni Indrawati, Yuliasuti, Rian Amukti	229
26.	IDENTIFIKASI SEBARAN POTENSI DERAH INTEREST PLTN DENGAN MENGGUNAKAN ANALISA RASTER DI PROVINSI NUSA TENGGARA BARAT Euis Etty A., Abimanyu Bondan W. S., Hadi Suntoko	237
27.	KAJIAN POTENSI BAHAYA EKSTERNAL ALAMIAH DALAM PENETAPAN TAPAK PLTN DI INDONESIA: STUDI KASUS TAPAK BANGKA Siti Alimah, Hadi Suntoko, Kurnia Anzhar, June Mellawati	243
28.	KAJIAN AWAL KAWASAN LEPAS PANTAI INDONESIA SEBAGAI LOKASI CALON TAPAK PLTN Sahala Maruli Lumbanraja, Rr. Arum Puni Rijanti	253
29.	PENGARUH KOMPOSISI ISOTOP DAN DENSITAS BAHAN BAKAR TERHADAP PARAMETER KRITIKALITAS DAN KINETIK PWR AP1000 Tagor Malem Sembiring, Surian Pinem	263

30.	PERLIMINARY DESIGN FOUNDATION OF TURBINE BUILDING, EXPERIMENTAL POWER REACTOR Eko Rudi Iswanto, Abdul Hafid	269
31.	PERHITUNGAN FLUKS NEUTRON PADA POSISI ELEMEN BAKAR TERAS 90 RSG GAS MENGGUNAKAN PAKET PROGRAM BATAN-3DIFF Elisabeth, Ratnawati Sutrisno	281
32.	STUDI KARAKTERISTIK PRODUK HASIL FISI REAKTOR RISET BERBASIS URANIUM SILISIDA PADA BERBAGAI LEVEL DAYA Anis Rohanda, Abdul Waris, Slamet Suprianto, Rizal Kurniadi	287
<u>KELOMPOK D : MATERIAL SAINS</u>		
33.	TEKNIK PEMBUATAN BAJA ODS Fe 25Cr 0.5 ZrO <sub>2</sub> MENGGUNAKAN METODA ARC PLASMA SINTERING Rohmad Salam, Arbi Dimiyati, Sumaryo	297
34.	EKSTRAKSI THORIUM DARI MONASIT BANGKA DENGAN METODE SOLVENT IMPREGNATED RESIN (SIR) Riesna Prassanti, Rudi Pudjianto	303
35.	PENENTUAN HVL BATA HEBEL DAN TIMAH HITAM PENAHAN RADIASI BETATRON 7 MeV Djoli Soembogo	309
36.	KETAHANAN EROSI KAVITASI PADUAN BERBASIS NIKEL UNTUK APLIKASI GENERATOR UAP REAKTOR DAYA EKSPERIMENTAL Muhammad Awwaluddin, Sri Hastuty	317
37.	PELINDIAN Y HASIL DEKOMPOSISI PASIR SENOTIM MENGGUNAKAN Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> DAN NaHCO <sub>3</sub> Tri Handini, Wahyu Rachmi Pusparini, Harry Supriadi	325
38.	SIMULASI PRODUKSI <sup>99</sup> Mo PADA REAKTOR HOMOGEN CAIR MENGGUNAKAN PROGRAM KOMPUTER MCNP6 Arif Isnaeni	333
39.	PROSPEK TORIUM SEBAGAI BAHAN BAKAR NUKLIR MASA DEPAN DI INDONESIA: KAJIAN ASPEK GEOLOGI Ngadenin, Heri Syaeful, I Gede Sukadana, Fd. Dian Indrastomo	339
40.	IDENTIFIKASI PRODUK FISI PENTING PADA FASILITAS UJI SAMOP Azizul Khakim	351
41.	KAJIAN TEKNIS KLASIFIKASI SISTEM, STRUKTUR DAN KOMPONEN (SSK) REAKTOR NUKLIR Arifin M. Susanto, Bintoro Aji, Catur Febriyanto	359
<u>KELOMPOK E : SDM, MANAJEMEN, DAN INDUSTRI</u>		
42.	KEBUTUHAN SUMBER DAYA PADA EVALUASI TAPAK RDE Sriyana, Yuliatuti, Heri Syaiful, Ewitha Nurulhuda	371
43.	ANALISIS KEBIJAKAN PROGRAM MANAJEMEN PENGETAHUAN DALAM MEMENUHI KOMPETENSI SDM NUKLIR Yuri Garini, Harini Wahyuningrum, Oly Desrianti	377
44.	RESILIENCE ENGINEERING, MANAGEMENT SYSTEM AND LEADERSHIP SPECTRUM APPROACH FOR THE HIGH-RISK ORGANISATION I Wayan Ngarayana, Jepri Sutanto, Suzie Darmawati	385
45.	PENILAIAN TINGKAT RISIKO PADA PROYEK PLTN Imam Bastori, Edwaren Liun	395
46.	PENGARUH KETERLAMBATAN PADA TAHAP PRA DAN PASCA KONSTRUKSI TERHADAP BIAYA POKOK PRODUKSI LISTRIK PLTN Rizki Firmansyah S. B., Wiku Lulus Widodo	405

47.	POTENSI PEMANFAATAN PANAS PLTN TIPE HTGR UNTUK INDUSTRI DI PROVINSI BANTEN Dharu Dewi, Siti Alimah	415
48.	POTENSI INDUSTRI INTERNASIONAL DALAM MEMASOK KOMPONEN BAGIAN NUKLIR PEMBANGUNAN REAKTOR DAYA EKSPERIMENTAL (RDE) DI INDONESIA Moch. Djoko Birmano, Arief Tris Yuliyanto	427
49.	KEMAMPUAN INDUSTRI TURBIN LOKAL DAN PROSPEKNYA UNTUK PROGRAM PEMBANGUNAN RDE DI INDONESIA Dharu Dewi, Arief Tris Yuliyanto, Sriyana	439
50.	PEMBUATAN SUMBER STANDAR 1311 UNTUK KALIBRASI ALAT UKUR AKTIVITAS STACK MONITOR PADA FASILITAS NUKLIR Hermawan Candra, Gatot Wurdianto, Holnisar	447
<u>KELOMPOK F : REGULASI DAN LAIN-LAIN</u>		
51.	KAJIAN ASPEK HUKUM PLTN TERAPUNG DI INDONESIA Mudjjiono, Yaziz Hasan	455
52.	TINJAUAN ANALISIS KEKRITISAN DALAM REVISI PERATURAN KEPALA BAPETEN NOMOR 10 TAHUN 2006 Catur Febriyanto S.	461
53.	IDENTIFIKASI PENGEMBANGAN PERATURAN BAPETEN MENGENAI KESELAMATAN RADIASI DALAM PENGGUNAAN IRADIATOR Hermawan Puji Yuwana, Chrisantus Aristo Wirawan Dwipayana	469
54.	KAJIAN TENTANG <i>DESIGN EXTENSION CONDITION</i> DAN <i>DEFENCE IN DEPTH</i> TERKAIT PERATURAN KESELAMATAN DESAIN PLTN Diah Hidayanti Sukarno	477
55.	KAJIAN FORMAT DAN ISI LAPORAN ANALISIS KESELAMATAN REAKTOR DAYA Agus Waluyo, Reno Alamsyah	487
56.	KARAKTERISTIK ISI PEMBERITAAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA NUKLIR DI MEDIA MASSA PADA TAHUN 2017 Yustantiana, Purnomo	495
57.	PERAWATAN DAN UJI FUNGSI RUTIN SISTEM AIR PENDINGIN SIKLOTRON CS-30 BATAN Rustama, Parwanto, Edi Slamet R.	507
58.	FASILITAS DAUR BAHAN BAKAR NUKLIR DI DUNIA Nurlaila, Dharu Dewi	513
INDEKS PENULIS MAKALAH		xiii

# **KELOMPOK A**

---

---

**PERENCANAAN ENERGI, FINANSIAL, KESELAMATAN DAN  
SEIFGARD**

Halanan ini sengaja dikosongkan

## KAJIAN KEBIJAKAN STRATEGIS FOKUS BIDANG ENERGI DI BATAN

Falikul Fikri<sup>1</sup>, Dwi Irwanti<sup>2</sup>, Sriyana<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>BATAN-Biro Perencanaan, Kuningan Barat MampangPrapatan Jakarta 12710

<sup>3</sup>BATAN-PPEN, Kuningan Barat MampangPrapatan Jakarta 12710

email: fikri@batan.go.id

### ABSTRAK

**KAJIAN KEBIJAKAN STRATEGIS FOKUS BIDANG ENERGI NUKLIR DI BATAN.** Pada tahun 2020 jumlah penduduk Indonesia diperkirakan mencapai 271,1 juta jiwa sehingga akan membutuhkan penyediaan energi dan pangan yang cukup besar. Oleh karena itu, pemerintah Indonesia melalui RPJMN 2015-2019 menetapkan arah kebijakan umum kedaulatan energi dan pangan. Kebijakan tersebut diwujudkan melalui pemantapan ketahanan energi dan pangan menuju kemandirian nasional. Kemandirian energi diwujudkan dalam pemenuhan bauran energi nasional yang optimal dengan mempertimbangkan jaminan keamanan pasokan dan keberlanjutan pemenuhannya. Kebijakan Energi Nasional (KEN) menetapkan target bauran energi dalam memaksimalkan penggunaan energi baru dan energi terbarukan, tahun 2025 (23%) dan tahun 2050 (31%) sulit dicapai tanpa pelibatan energi nuklir. Kebijakan nasional terkait perundangan-undangan energi nuklir belum optimal dan komprehensif. Makalah ini bertujuan untuk membantu pimpinan dalam mengatur kebijakan yang berkaitan dengan energi nuklir mendukung kemandirian energi nasional. Metodologi pengambilan data menggunakan data sekunder yang terdiri atas bahan hukum primer yang berupa peraturan perundangan-undangan yang berkaitan dengan energi nuklir dan bahan hukum tersier yang berupa hasil penelitian, pengkajian, dan referensi lainnya serta data lain yang terkait. Metodologi pengolahan datanya menggunakan metode deskriptif melalui pendekatan yuridis normatif. Dengan metode dan pendekatan ini diharapkan dapat menggambarkan berbagai permasalahan secara utuh dan menyeluruh, sehingga hasil analisis permasalahannya dapat dipergunakan sebagai landasan hukum. Diharapkan adanya kajian ini akan muncul kebijakan pemerintah terkait kegiatan penelitian, pengembangan, perekayasaan, penerapan dan pendayagunaan iptek nuklir khususnya kebijakan energi nuklir secara komprehensif agar pihak-pihak strategis yang terlibat dapat berjalan sesuai jalurnya.

Kata kunci :kebijakan strategis, energi nuklir, peraturan

### ABSTRACT

**STUDY OF THE FOCUS STRATEGIC POLICY OF NUCLEAR ENERGY FIELDS IN BATAN.** In 2020 Indonesia's population is estimated to reach 271.1 million people so that it will require a large supply of energy and food. Therefore, the Indonesian government through the 2015-2019 RPJMN stipulates the general policy direction for energy and food sovereignty. This policy is realized through strengthening energy and food security towards national independence. Energy independence is realized in fulfilling the optimal national energy mix by considering the security of supply security and the sustainability of its fulfillment. The National Energy Policy (KEN) sets an energy mix target to maximize the use of new energy and renewable energy, by 2025 (23%) and 2050 (31%) it is difficult to achieve without involving nuclear energy. National policies related to nuclear energy legislation have not been optimal and comprehensive. This paper aims to assist leaders in regulating policies related to nuclear energy to support national energy independence. Methodology of data collection uses secondary data consisting of primary legal materials in the form of legislation relating to nuclear energy and tertiary legal materials in the form of results research studies, and other references and other relevant data. The data processing methodology uses descriptive method through normative juridical approach. With this method and approach it is expected to describe various problems in a comprehensive and comprehensive manner, so that the results of the analysis of the problem can be used as a legal basis. It is hoped that this study will emerge government policies related to research, development, engineering, application and utilization of nuclear science and technology, especially nuclear energy policies in a comprehensive manner so that the strategic parties involved can walk according to their path.

Keywords: strategic policy, nuclear energy, regulation

## PENDAHULUAN

Jumlah penduduk Indonesia diperkirakan pada tahun 2020 mencapai 271,1 juta jiwa sehingga akan membutuhkan penyediaan energi dan pangan yang cukup besar. Oleh karena itu, pemerintah Indonesia melalui RPJMN 2015-2019 menetapkan arah kebijakan umum kedaulatan energi dan pangan. Kebijakan tersebut diwujudkan melalui pemantapan ketahanan energi dan pangan menuju kemandirian nasional. Kondisi energi Indonesia saat ini masih sangat tergantung pada energi fosil yaitu minyak, gas dan batubara. Hal ini ditunjukkan oleh fakta, bahwa produksi minyak dan gas Indonesia saat ini tidak mencukupi untuk memenuhi kebutuhan dalam negeri. Sedangkan untuk energi baru dan energi terbarukan, Indonesia memiliki potensi yang beragam, namun pengelolaan dan penggunaannya belum optimal. Berbagai potensi energi tersebut antara lain: energi nabati, gas, panas bumi, nuklir, surya, angin dan laut. Energi nuklir adalah energi yang memanfaatkan teknologi ramah lingkungan dan tidak menimbulkan emisi gas rumah kaca. Pemanfaatan energi nuklir akan menghemat sumber daya energi fosil yang bisa dimanfaatkan untuk generasi di masa depan dan sekaligus dapat mengurangi gas rumah kaca sebesar 26% dengan kemampuan sendiri dan sebesar 41% dengan bantuan negara lain. Dengan mempertimbangkan hal tersebut, energi nuklir dapat menjadi andalan untuk pemenuhan target bauran energi sekaligus untuk keamanan pasokan energi di Indonesia.

Kebijakan Energi Nasional (KEN)[1] menetapkan target bauran energi dalam memaksimalkan penggunaan energi baru dan energi terbarukan, tahun 2025 (23%) dan tahun 2050 (31%) sulit dicapai tanpa pelibatan energi nuklir. Kebijakan nasional terkait perundangan-undangan energi nuklir belum optimal dan komprehensif. Terlebih lagi, Presiden pertama Republik Indonesia, Ir. Soekarno pada peletakan batu pertama pembangunan reaktor riset Bandung pada tanggal 9 April 1961 menyampaikan sekarang kita pasti masuk pada *"the era of atomic energy"*. Namun demikian, visi Bapak Pendiri Bangsa ini belum secara konsisten dilaksanakan oleh Pemimpin Nasional selanjutnya, khususnya dalam menetapkan keputusan penggunaan nuklir untuk listrik. Keputusan *go nuclear* saat ini akan sangat mendukung pembangunan infrastruktur yang sangat masif.

Tantangan utama yang dihadapi dalam sektor energi nuklir adalah meningkatkan keyakinan para pengambil keputusan (*decision maker*) terhadap keandalan dan keamanan teknologi nuklir, meningkatkan kemampuan industri nasional dalam memasok komponen PLTN, meningkatkan kemampuan dalam pendanaan, penyiapan sumberdaya manusia dan meningkatkan keberterimaan masyarakat terhadap penggunaan nuklir sebagai pembangkit listrik.

Dasar pertimbangan yang digunakan dalam perencanaan pembangunan PLTN di Indonesia tertuang dalam Undang-Undang Nomor 17 Tahun 2007 tentang Rencana Pembangunan Jangka Panjang Nasional (RPJPN)[2], yang dinyatakan di dalam Lampiran, bahwa "... energi nuklir sudah mulai dimanfaatkan dalam pasokan listrik nasional pada RPJPN ke III (2015-2019) dengan memperhatikan faktor keselamatan yang ketat".

Dengan mengacu pada ketentuan tersebut maka kebijakan di bidang energi dapat diarahkan pada penyiapan infrastruktur dan sumberdaya manusia yang terkait dengan penguasaan teknologi, manajemen pembangunan, pengoperasian dan perawatan reaktor nuklir untuk pembangkit listrik. Dengan kesiapan tersebut, maka proses pembangunan dan pengoperasian PLTN dapat dilakukan dengan baik. Selain itu, proses alih teknologi oleh putra-putri Indonesia dapat dilakukan lebih cepat.

Untuk mewujudkan arah dan kebijakan nuklir di bidang energi, masih terdapat beberapa kendala, diantaranya:

1. Belum sepenuhnya para penentu kebijakan di bidang energi memiliki keyakinan terhadap keamanan energi nuklir sebagai pembangkit listrik di Indonesia, sehingga nuklir masih ditempatkan sebagai alternatif terakhir dalam KEN.
2. Sebagian masyarakat Indonesia belum dapat menerima PLTN karena ada kekhawatiran terhadap kemampuan SDM, kemungkinan terjadinya kecelakaan, dan penanganan terhadap limbah radioaktif yang dapat mencemari lingkungan.
3. Masih terbatasnya kemampuan industri nasional dalam memasok komponen PLTN.
4. Adanya kekhawatiran terhadap potensi bencana alam, dan
5. Terbatasnya kemampuan pendanaan oleh Pemerintah dan investor nasional.

Adapun tujuan penyusunan makalah ini adalah merumuskan permasalahan-permasalahan yang timbul dalam kebijakan sektor energi nuklir, merumuskan keterkaitan

rancangan peraturan perundang-undangan dengan peraturan perundang-undangan yang relevan, serta merumuskan sasaran yang akan diwujudkan, ruang lingkup pengaturan, jangkauan dan arah pengaturan.

Hasil analisis atas dasar permasalahan tersebut diatas diharapkan memberikan arah dan pertimbangan hukum dalam penyusunan kerangka kerja sebagai landasan dalam pembuatan kebijakan yang meliputi penetapan tujuan dan sasaran, strategi, pelaksanaan program dan fokus kegiatan, serta implementasi, pengembangan, dan pemanfaatan yang dilaksanakan secara nasional agar pihak-pihak strategis yang terlibat dapat berjalan sesuai jalurnya.

### TEORI KEBIJAKAN STRATEGIS

Tercantum dalam literatur ilmu administrasi, kebijakan disebut sebagai bagian dari dimensi strategis administrasi publik. Kebijakan menurut Nugroho[3] adalah teori yang berasal dari pengalaman terbaik, bukan diawali dari temuan, kajian akademik atau penelitian ilmiah. Berada pada pemahaman *lay theory* bukan *academical theory*. Ranah keberhasilan atau kegagalan analisis kebijakan berkenaan dengan produk akhirnya yaitu kebijakan publik. Analisis kebijakan menurut Dunn[4], adalah sebuah disiplin ilmu sosial terapan yang menggunakan multiple metode untuk meneliti dan berargumen untuk menghasilkan informasi yang relevan dengan kebijakan dalam tatanan politik untuk mengatasi masalah kebijakan.



**Gambar 1 Proses analisis kebijakan**

Metode analisisnya yaitu: definisi, prediksi, preskripsi, deskripsi dan evaluasi. Proses analisisnya: 1) merumuskan masalah 2) peramalan masa depan kebijakan 3) rekomendasi kebijakan 4) pemantauan hasil kebijakan 5) evaluasi kinerja kebijakan. Menurut Dunn kebijakan publik tidak hanya harus baik dalam perumusan tapi juga baik dalam komunikasi pada publik.

Kenyataannya untuk memproses sebuah keputusan yang efektif dibutuhkan serangkaian prinsip, seperti prinsip rasionalitas, teknis maupun politis output dari proses tersebut dapat berupa keputusan tentang alternatif terbaik yang siap untuk diimplementasikan. Kebijakan merupakan dimensi yang sangat penting, mengingat kedudukannya sebagai penentu tentang apa yang hendak dikerjakan. Sedangkan apa yang hendak dikerjakan harus didasarkan atas masalah, kebutuhan, atau aspirasi tertentu. Jadi tidak benar kalau suatu kebijakan diputuskan tanpa ada masalah, kebutuhan atau aspirasi yang nyata dan tentu saja tidak bisa didasarkan pada masalah atau kebutuhan yang dikarang pihak tertentu untuk memenuhi kepentingannya. Mengingat kebijakan bagian dari administrasi publik, maka yang menjadi perhatian adalah masalah, kebutuhan, dan aspirasi publik. Oleh karena itu agar kebijakan yang diambil menjadi sebuah solusi terhadap berbagai masalah yang dihadapi masyarakat, maka perlu dirumuskan suatu strategi dalam penyusunan kebijakan tersebut.

Formulasi Strategi[5] menurut Wheelen dan Hunger[6] adalah proses mengembangkan rencana jangka panjang untuk mewujudkan manajemen yang efektif terhadap peluang dan tantangan yang berasal dari luar di dalam kerangka kekuatan dan kelemahan yang dimiliki oleh suatu organisasi. Yang termasuk di dalam tahapan ini ialah menentukan misi dari organisasi, menentukan tujuan yang ingin dicapai, mengembangkan strategi, dan menentukan arah kebijakan.

Tahapan selanjutnya dari proses manajemen stratejik adalah implementasi strategi. Implementasi strategi adalah sebuah proses dimana strategi dan kebijakan dijabarkan menjadi tindakan melalui perumusan program, anggaran, dan prosedur. Tahapan terakhir dari proses manajemen stratejik adalah evaluasi dan pengendalian. Evaluasi dan pengendalian adalah sebuah proses dimana hasil dari aktivitas dan kinerja dari organisasi

dimonitor sehingga kinerja yang dihasilkan dapat dibandingkan dengan kinerja yang diinginkan.

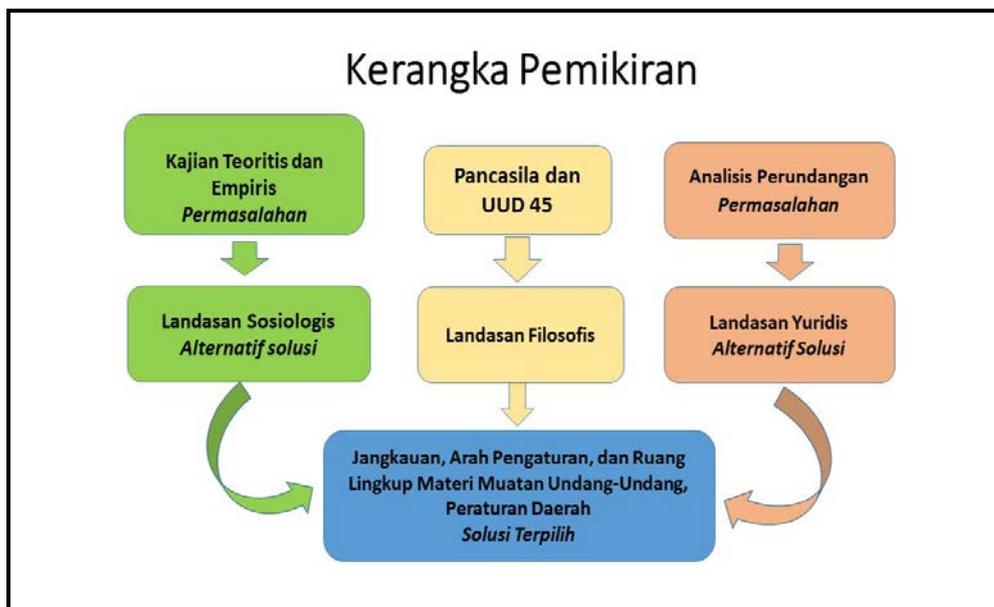
Strategi kebijakan perlu dijalankan mengingat banyak faktor yang harus diperhatikan dan berpengaruh terhadap produk akhir sebuah kebijakan. Faktor-faktor yang mempengaruhi dalam penyusunan kebijakan tersebut adalah faktor eksternal — berupa pengaruh lingkungan, sosial-politik serta para stakeholder yang memiliki kepentingan terhadap produk kebijakan, dan faktor internal seperti masalah kelembagaan, sumber daya manusia, masalah ketersediaan waktu atau masalah sumber biaya/anggaran.

## METODOLOGI

Metodologi penyusunan makalah ini menggunakan metode deskriptif[7] melalui pendekatan yuridis normatif. Dengan metode dan pendekatan ini diharapkan dapat menggam-barkan berbagai permasalahan secara utuh dan menyeluruh, sehingga hasil analisis permasalahannya dapat dipergunakan sebagai landasan hukum, khususnya hukum tertulis yang berlaku dan diatur dalam peraturan perundang-undangan yang berkaitan energi nuklir.

Pengolahan data menggunakan data sekunder yang terdiri atas bahan hukum primer yang berupa peraturan perundang-undangan yang berkaitan dengan energi nuklir dan bahan hukum tersier yang berupa hasil-hasil penelitian, pengkajian, dan referensi lainnya, serta data hasil diskusi (*focus group discussion*) bidang energy.

Kerangka logik pemikiran dalam penelitian dijabarkan pada bagan alir gambar 2.



Gambar 1 Bagan Alir Kerangka Pemikiran

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Kajian Teoritis

Indonesia memiliki kekayaan sumber daya alam dan keanekaragaman hayati melimpah. Kekayaan alam tersebut jika dikelola secara baik dan penuh tanggung jawab dapat mengantarkan kesejahteraan masyarakat. Namun, kekayaan alam tersebut belum dikelola dengan bijak, berkeadilan dan terpadu antara satu sektor dengan sektor lainnya, sehingga belum bisa dinikmati secara terjangkau dan belum semua masyarakat bisa mengakses secara mudah. Selain itu, belum adanya harmonisasi peraturan perundang-undangan khususnya implementasi energi nuklir yang bisa mengatur kebijakan nasional secara komprehensif. Potensi sumber daya alam yang besar, dan dengan berbagai inovasi dari beberapa pihak sebagai penggerak ekonomi nasional ke depan, merupakan tantangan nyata bagi pengelolaan sumber daya alam Indonesia. Potensi tersebut dapat terwujud dalam bentuk produk komersial yang mampu bersaing dalam pasar global. Semua itu memerlukan dukungan dan pengaturan secara nasional.

BATAN merupakan lembaga yang bertugas melaksanakan litbangrap iptek nuklir dan berperan dalam pembangunan iptek nuklir. Peran tersebut untuk mendukung ketahanan pangan dan energi, penyediaan teknologi kesehatan, pengelolaan SDAL, pengembangan teknologi material maju, serta peningkatan jumlah penemuan (inovasi) dan pemanfaatannya dalam sektor industri. Dengan demikian diharapkan sampai dengan tahun 2025, kemandirian di bidang teknologi nuklir dapat dicapai melalui dukungan kompetensi dan infrastruktur di bidang energi dan non energi.

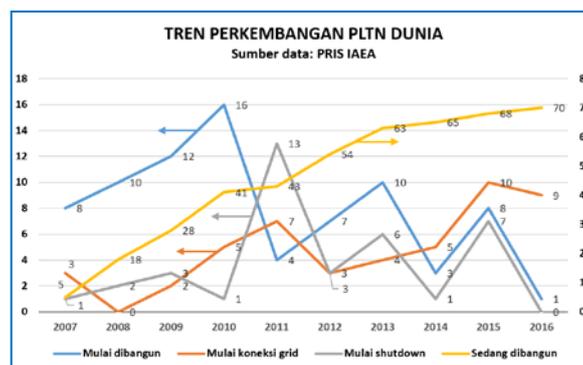
### Praktik Empiris

Secara internasional, kemajuan penerapan iptek nuklir dalam bidang energi yakni untuk pembangkit tenaga listrik telah berkembang sangat pesat. Berbagai jenis reaktor daya untuk PLTN yang telah dapat beroperasi secara komersial di negara maju antara lain adalah jenis *Pressurised Water Reactor (PWR)*, *Boiling Water Reactor (BWR)*, *Pressurised Heavy Water Reactor (PHWR)*, *High Temperature Reactor (HTR)* dan bahkan setelah insiden Chernobyl telah berkembang pesat reaktor jenis maju dengan keselamatan yang jauh lebih tinggi. Selain penekanan pada keselamatan dan efisiensi, keberlanjutan (*sustainability*) pengoperasian PLTN juga menjadi salah satu aspek penting dalam pengembangan teknologi reaktor daya.

Sejalan dengan beroperasinya PLTN generasi III+, PLTN generasi IV HTR-PM mulai dibangun di Shidaowan-Shandong, Tiongkok yang akan beroperasi secara komersial pada akhir tahun 2017. HTR-PM merupakan PLTN generasi terkini (Generasi ke-4) yang mengandalkan sistem keselamatannya pada sistem keselamatan inheren yang memungkinkan pencegahan kecelakaan parah semaksimal mungkin, bahkan dapat dikatakan bahwa PLTN tidak mungkin mengalami kecelakaan parah seperti yang pernah terjadi sebelumnya.

Perkembangan teknologi PLTN *Small and Medium Sized Reactors (SMR)*, yang diharapkan dapat mengatasi hambatan dan kesulitan investasi pembangunan PLTN pertama di suatu negara berkembang, sudah menunjukkan hasil yang nyata dengan dibangunnya HTR-PM 250MWt/105MWe, reaktor generasi ke-4 dengan ukuran kecil (pembangkitan daya lebih kecil dari 300 MWe). PLTN tipe SMR lain yang dapat menjadi bukti perkembangan positif adalah telah dibangunnya PLTN terapung KLT-40S oleh Akademik Lomonosov di Baltiisky Zavod Rusia, yang nantinya akan ditempatkan di Pevek-Chukotka pada tahun 2018. PLTN terapung banyak diminati negara berkembang bertopografi kepulauan seperti Indonesia, dengan banyak pulau-pulau kecil yang terpisah. Mobilitas dan efisiensi bahan bakar sangat memenuhi harapan sebagai pemasok energi listrik di pulau kecil dengan infrastruktur listrik yang minim. PLTN tipe SMR yang menyerap banyak inovasi teknologi terbaru akan menemui banyak hambatan dalam hal regulasi karena keterlambatan antisipasi badan regulasi tenaga nuklir. Dunia banyak menyandarkan inisiatif modifikasi pembaharuan regulasi kepada Badan Regulasi Nuklir Amerika, *US-Nuclear Regulation Commission (US-NRC)*, yang cenderung memilih teknologi konservatif yaitu PLTN berpendingin air ringan, *Light Water Reactors (LWR)*, versi daratan (*land base nuclear power plant*).

Pertumbuhan energi listrik yang dihasilkan dari PLTN pasca kecelakaan Fukushima Daiichi tahun 2011 terlihat menurun, namun IAEA memprediksi bahwa energi nuklir masih akan menjadi salah satu sumber energi utama di dunia. Beberapa negara di kawasan Asia, seperti Korea Selatan, Tiongkok, India dan Pakistan tetap melanjutkan program pembangunan PLTN-nya.



Gambar 3 Tren Perkembangan PLTN Dunia

Untuk menjamin keamanan pasokan energi, negara-negara kaya minyak seperti Arab Saudi merencanakan program pembangunan 18 unit PLTN masing-masing berkapasitas 1.000 Mwe dan ditargetkan beroperasi pada tahun 2032. Demikian juga Uni Emirat Arab (UEA) sedang melakukan konstruksi 4 unit PLTN masing-masing berkapasitas 1.400 MWe. Hal ini menunjukkan bahwa ketahanan energi akan memainkan peran yang sangat penting dalam ekonomi dan politik global. Saat ini, terdapat lebih dari 60 unit PLTN yang sedang dibangun dan sebagian besar diantaranya berlokasi di wilayah Asia[8]. Tiongkok, sebagai negara pemilik cadangan batu bara terkaya nomor tiga di dunia, menjadi negara yang paling ekspansif membangun PLTN, di mana saat ini Tiongkok sedang melakukan konstruksi 20 unit PLTN[9] untuk mencegah eksploitasi batu bara secara besar-besaran dalam rangka menjaga ketahanan energi nasionalnya sekaligus memperbaiki kualitas udaranya. Berdasarkan data PRIS (Gambar-3) diramalkan tren perkembangan PLTN akan terus berlanjut untuk mengurangi emisi karbon. Hambatan biaya pembangunan PLTN baru, disiasati dengan perbaikan menyeluruh (*refurbishment*) dari PLTN lama yang masih layak untuk dioperasikan sehingga tren penutupan PLTN menurun.

Di masa mendatang PLTN diharapkan akan menjadi pemasok energi masif yang ramah lingkungan dan membutuhkan kerja sama internasional. Para pakar PLTN menyadari bahwa teknologi keselamatan PLTN menjadi tanggung jawab bersama secara internasional, karena dampak kecelakaan yang ditimbulkan juga membawa pengaruh secara internasional.

Perkembangan iptek nuklir bidang energi di Indonesia telah diletakkan dasarnya sejak tahun 1954 yang ditandai dengan pembentukan panitia negara untuk menyelidiki radioaktivitas. Panitia Negara tersebut mempunyai tugas melakukan penyelidikan terhadap kemungkinan adanya jatuhnya debu radioaktif dari uji coba senjata nuklir kepulauan Pasifik. Selanjutnya penelitian dan litbang iptek nuklir terus dilaksanakan guna penguasaan iptek nuklir dan memberikan manfaat bagi kesejahteraan bangsa.

Semangat ingin menguasai dan memanfaatkan energi nuklir sudah dicanangkan oleh Presiden pertama Republik Indonesia, Ir. Soekarno dalam pidato sambutan peletakan batu pertama pembangunan reaktor riset Bandung pada tanggal 9 April 1961, menyampaikan bahwa saat sekarang kita pasti masuk pada "*the era of atomic energy*". Namun demikian, visi Bapak Pendiri Bangsa ini belum secara konsisten dilaksanakan oleh Pemimpin Nasional selanjutnya, khususnya dalam menetapkan keputusan penggunaan nuklir untuk listrik.

Peletakan dasar kebijakan oleh Bapak Pendiri Bangsa terus memberikan dasar dan dorongan semangat untuk melakukan penelitian dan pengembangan iptek nuklir di berbagai bidang termasuk pemanfaatannya di bidang energi. Infrastruktur kelembagaan terus berkembang menuju wujud kelembagaan yang efektif dan efisien dalam mengemban tugas penguasaan iptek nuklir dan pemanfaatannya.

Implementasi pemanfaatan iptek nuklir di bidang energi belum dirasakan dampaknya secara nasional, baik penelitian yang mendukung pengembangan energi terbarukan (penelitian dan pengembangan sumber energi nabati: biodeisel, dll.) maupun pemanfaatan iptek nuklir secara langsung untuk pembangkit listrik untuk menyumbang dan berperan dalam bauran energi nasional. Bahkan meskipun telah lama diamanahkan dalam peraturan perundang-undangan yang ada, hingga saat ini pemanfaatan iptek nuklir dalam bidang energi masih terkendala.

Kesiapan menyongsong pemanfaatan teknologi nuklir di bidang energi dapat diukur dari kesiapan infrastruktur pembangunan energi nuklir. Penyediaan infrastruktur yang sesuai untuk mendukung keberhasilan pembangunan PLTN secara aman, selamat, damai dan efisien merupakan hal yang sangat penting. Penyiapan infrastruktur pembangunan PLTN, berbeda dari pembangkit listrik lainnya, lebih memerlukan kajian mendalam dan komprehensif terkait dengan aspek keselamatan. Menurut *International Atomic Energy Agency* (IAEA), infrastruktur yang diperlukan untuk mendukung implementasi PLTN meliputi cakupan yang luas, baik aspek infrastruktur lunak (*soft infrastructures*) maupun aspek infrastruktur keras (*hard infrastructures*).

Pada tahun 2008, Indonesia secara komprehensif telah melakukan swa-evaluasi kesiapan infrastruktur pembangunan PLTN untuk fase pertama, yakni fase evaluasi kesiapan infrastruktur untuk menuju penetapan proyek pembangunan PLTN. Evaluasi ini mengacu pada panduan IAEA tentang evaluasi status pengembangan infrastruktur PLTN secara nasional. Swa-evaluasi ini diselesaikan pada tahun 2009. Metode evaluasi yang digunakan ini dikenal dengan *milestone approach* yang menunjukkan tahapan/fase kesiapan infrastruktur untuk membangun PLTN yaitu: (1) fase pertama: kesiapan infrastruktur untuk

pertimbangan menuju penetapan pelaksanaan proyek pembangunan PLTN; (2) fase kedua: kesiapan infrastruktur untuk persiapan pelaksanaan konstruksi PLTN; (3) fase ketiga: kesiapan infrastruktur untuk implementasi pembangunan dan pengoperasian PLTN.

Hasil swa-evaluasi ini dievaluasi oleh IAEA melalui *Integrated Nuclear Infrastructure Review Mission (INIR Mission)* yang dilaksanakan pada bulan November 2009, di Jakarta. Hasil tinjauan (*review*) oleh IAEA berupa rekomendasi dan saran yang disampaikan kepada Indonesia pada bulan Mei 2010. Secara ringkas disampaikan dalam hasil ulasan tersebut bahwa Indonesia telah melakukan persiapan yang luas pada sebagian besar aspek infrastruktur yang memungkinkan untuk lebih mempertimbangkan pemanfaatan energi nuklir, dan dapat melangkah pada persiapan untuk fase kedua, yakni fase persiapan pelaksanaan konstruksi pembangunan PLTN. Disarankan bahwa terkait dengan tanggung jawab pemilik/operator PLTN, persiapan lebih lanjut masih diperlukan, yakni kebijakan pemerintah yang lebih jelas untuk memanfaatkan nuklir sebagai pembangkit listrik dalam bauran energi nasional.

IAEA menyebutkan dalam hasil ulasan tersebut bahwa masih ada 3 (tiga) aspek infrastruktur (dari 19 aspek) yang memerlukan tindakan yang signifikan, yakni aspek posisi nasional, aspek manajemen dan aspek keterlibatan pemangku kepentingan[10]. Ketiga aspek infrastruktur tersebut saling terkait satu sama lain, yakni pada kebijakan pemerintah untuk menetapkan kebijakan pemanfaatan energi nuklir secara jelas yang ditandai dengan kebijakan yang berorientasi pada proyek pembangunan PLTN. Pembentukan organisasi yang bertugas untuk mengoordinasikan persiapan infrastruktur pembangunan PLTN pada level institusi tinggi (*high level policy*) akan lebih memperjelas adanya langkah yang nyata untuk menuju kebijakan yang berorientasi proyek PLTN ini.

Terkait dengan organisasi pelaksana persiapan infrastruktur pembangunan PLTN, IAEA menyarankan perlu dibentuknya *Nuclear Energy Program Implementation Organization (NEPIO)*[11]. Organisasi ini berperan dalam implementasi program energi nuklir, yang mencakup persiapan untuk menetapkan keputusan program energi nuklir sampai pada pelaksanaannya, mengoordinasikan institusi terkait pada pelaksanaan pemanfaatan energi nuklir atau berperan dalam implementasi program energi nuklir itu sendiri. Organisasi ini nantinya diharapkan membentuk infrastruktur kelembagaan lain yang diperlukan, seperti: pemilik PLTN dan organisasi lain yang diperlukan. NEPIO berperan dalam mengantarkan terwujudnya implementasi pemanfaatan energi nuklir sebagai pembangkit listrik.

### **Kajian Terhadap Praktik Penyelenggaraan, Kondisi yang Ada, serta Permasalahan yang Dihadapi Masyarakat**

Indonesia, dengan wilayah yang sangat luas dan jumlah penduduk terbesar ke-4 di dunia, serta memiliki kekayaan sumber daya alam yang melimpah, memiliki potensi yang sangat besar untuk menjadi negara besar. Namun, potensi ini tidak akan pernah tercapai jika infrastruktur energi khususnya listrik tidak pernah memadai. Karena infrastruktur energi merupakan “nadi” dan bahkan “darah” bagi pembangunan dan keberlangsungan bangsa. Terlebih lagi Nugroho[12] menyampaikan “*Nuclear power is the most available possible option java can deploy to put its electricity supply and demand into better long term balance. Java has a more educated population that can be made ready to understand the benefits and risks associated with nuclear power. It will be unfair if the economically rich region of java continues to enjoy subsidized electricity and fuels at the burden of other regions, while they need to develop their energy resources to grow their economies.*”

Merujuk kepada Rencana Umum Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) tahun 2015-2024, kebutuhan listrik rata-rata di Indonesia meningkat sekitar 5.900 MWe/tahun sedangkan kemampuan nasional untuk memasok kebutuhan tersebut hanya mampu memenuhi sekitar 4.200 MWe/tahun. Sementara berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional (KEN), proyeksi kebutuhan listrik sampai tahun 2025 adalah sebesar 115 GWe, sehingga masih diperlukan tambahan kapasitas pembangkit sebesar 69 GWe dalam kurun waktu 11 tahun, atau 6,2 GWe/tahun.

Memperhatikan kemampuan IPP dan PLN serta target yang ditetapkan dalam KEN, diperkirakan akan ada sekitar 26% kebutuhan tambahan pembangkit sampai dengan tahun 2023 tidak dapat terpenuhi dan dikategorikan sebagai skema *unallocated*, yaitu belum ditetapkan pengembang dan sumber pendanaannya. Selain itu, keterlambatan operasional sejumlah pembangkit besar telah menyebabkan kapasitas cadangan operasi (*reservemargin*) menjadi berkurang. Dengan kondisi ini, diperkirakan mulai tahun 2016 akan terjadi kekurangan pasokan tenaga listrik di beberapa daerah karena cadangan operasi

semakin menipis kurang dari 25% (ideal 25-30%). Untuk mengantisipasi keterlambatan pertumbuhan kapasitas pembangkit, maka perlu dipertimbangkan pemanfaatan energi baru (nuklir) untuk pembangkitan tenaga listrik, mengingat skala kapasitas PLTN yang ada saat ini berada di antara 1.000-1.400 MW/unit.

Permasalahan sektor penyediaan tenaga listrik yang masih kita hadapi saat ini, antara lain: (1) Rasio elektrifikasi nasional tahun 2017 sebesar 93%. Angka ini cukup besar namun perlu dijamin keandalan pasokannya, sehingga masih perlu pasokan listrik yang besar. (2) Kekurangan pasokan listrik masih terjadi di beberapa daerah bahkan ada daerah "terpaksa" mengimpor listrik (Provinsi Kalimantan Barat dari Serawak). (3) Penggunaan energi fosil masih sangat dominan dalam pembangkitan listrik, salah satunya adalah PLTD, sehingga ketergantungan terhadap BBM masih sangat besar yang berdampak pada besarnya subsidi. (4) Pembangunan pembangkit listrik berbasis energi terbarukan (hidro, biomassa dan geotermal) belum dapat mengejar dan memenuhi permintaan pertumbuhan kebutuhan listrik. (5) Penggunaan energi terbarukan, seperti angin, matahari, ombak masih banyak mengalami kendala dalam hal stabilitas pasokan, kapasitas, efisiensi, dan harga keekonomian.

Target pertumbuhan kapasitas pembangkit 5.900 MWe per tahun dan pencapaian target 23% porsi energi baru terbarukan dalam bauran energi nasional akan sulit tercapai apabila hanya mengandalkan energi fosil dan energi terbarukan yang ada. Disisi lain Indonesia berkomitmen untuk mengurangi emisi gas rumah kaca, yang mempunyai konsekuensi pada pembatasan penggunaan energi fosil. Pilihan energi baru dan energi terbarukan yang paling siap dari aspek teknologi, keekonomian, keselamatan, untuk memikul beban dasar dalam waktu dekat adalah PLTN.

Keberhasilan mengoperasikan reaktor riset di Bandung sejak tahun 1965, di Yogyakarta sejak operasi tahun 1979, dan Reaktor Serbaguna 30 MW di Serpong sejak tahun 1987 beserta fasilitas penunjangnya merupakan prestasi anak bangsa dan menjadi modal besar dalam menyongsong pembangunan PLTN.

Studi kelayakan PLTN telah dilakukan secara komprehensif dan terintegrasi pada tahun 1992-1996 di Studi Tapak Studi Kelayakan (STSK) Muria, tahun 2011-2013 telah disiapkan beberapa alternatif infrastruktur tapak PLTN seperti tapak di Pulau Bangka, Semenanjung Muria - Jawa Tengah, Kalimantan Barat, Kalimantan Timur dan beberapa calon tapak lain yang masih dalam studi awal.

Dalam Undang-Undang Nomor 17 Tahun 2007 tentang Rencana Pembangunan Jangka Panjang Nasional 2005-2025, telah diamanatkan untuk memanfaatkan PLTN dengan pertimbangan keselamatan secara ketat. Pemanfaatan PLTN akan mendukung terwujudnya ketahanan energi untuk pembangunan berkelanjutan yang mempertimbangkan aspek lingkungan, kepentingan antar generasi, kebutuhan energi, sosial politik, geopolitik dan ekonomi. Namun demikian implementasi pemanfaatan iptek nuklir pada bidang energi, yang berupa pembangunan PLTN untuk memasok bauran energi nasional belum terlaksana.

Di Indonesia pengelolaan sumber daya alam masih belum berkelanjutan dan masih mengabaikan kelestarian fungsi lingkungan hidup sehingga daya dukung lingkungan terbebani dan ketersediaan sumber daya alam semakin berkurang. Persediaan air tanah sebagai sumber air bersih di Indonesia jumlahnya terbatas sehingga identifikasi kawasan yang berpotensi memiliki air yang lebih banyak dibanding kawasan lainnya menjadi sangat penting. Radioisotop dapat digunakan untuk identifikasi tersebut. Selain itu, pemanfaatan radioisotop juga digunakan untuk mengetahui peta, cadangan dan usia air tanah serta permasalahan kebocoran pada waduk atau bendungan, kepadatan tanah, aspal dan beton.

Permasalahan pengolahan limbah non-radioaktif dan radioaktif yang terus meningkat perlu peran serta berbagai sektor. Pengolahan limbah radioaktif secara umum dilakukan untuk mereduksi volume limbah dan mengurangi paparan radiasi agar tidak membahayakan manusia dan lingkungan. Indonesia telah memiliki instalasi pengolahan limbah radioaktif yang berfungsi untuk menyimpan limbah radioaktif dengan aktivitas rendah dan sedang, dan fasilitas kanal hubung instalasi penyimpanan sementara bahan bakar nuklir bekas yang berfungsi untuk menyimpan limbah radioaktif dengan aktivitas tinggi.

Identifikasi polutan udara merupakan tahap penting untuk mengatasi permasalahan pencemaran dan hanya dapat dilakukan secara komprehensif melalui karakterisasi yang mampu mendeteksi sebagian besar kandungan berbagai unsur yang terdapat dalam partikulat udara. Teknik analisis nuklir merupakan satu-satunya metode karakterisasi yang sesuai karena memiliki kemampuan mendeteksi secara simultan, sensitif, limit deteksi

hingga orde nanogram, cepat dan non destruktif. Hasil karakterisasi tersebut dapat digunakan untuk menghasilkan data polutan udara yang komprehensif berupa data set time series karakteristik partikulat udara ambien yang belum pernah ada di Indonesia. Hasil karakterisasi polutan udara yang spesifik (PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>10</sub>, BC dan multi unsur) yang akan digunakan sebagai *early warning* dan *baseline data* yang dapat dimanfaatkan untuk penentuan jenis dan sumber pencemar serta kajian *transboundary pollution*.

Salah satu dampak pencemaran udara adalah terjadinya pemanasan global seperti kenaikan suhu permukaan laut, pengasaman air laut dan meningkatnya frekuensi kejadian *Harmful Algal Bloom (HAB)*, meluasnya bencana kekeringan selama musim panas dan banjir pada musim hujan. Teknik nuklir juga sangat diperlukan untuk mengantisipasi dan memitigasi lebih lanjut dari dampak perubahan iklim.

Kecelakaan nuklir di Fukushima, lalu lintas pelayaran internasional dan rencana pembangunan PLTN di negara-negara tetangga membutuhkan antisipasi untuk melindungi perairan laut Indonesia seperti yang diamanahkan dalam Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2014 tentang Kelautan. Kondisi radioekologi kelautan nasional untuk mengantisipasi kemungkinan dampak yang ditimbulkan perlu mendapat perhatian.

Peta tingkat radiasi dan radioaktivitas alam Indonesia yang menggambarkan tingkat radiasi gamma dan radioaktivitas beberapa radionuklida telah berhasil disusun oleh BATAN pada tahun 2012. Peta tersebut akan menjadi acuan data dasar radiasi dan radioaktivitas alam Indonesia.

Berkaitan dengan sumberdaya mineral, iptek nuklir diaplikasikan dalam penyelidikan dan eksplorasi bahan galian nuklir hingga pengolahannya berupa pemisahan uranium dan thorium serta asosiasi unsurnya, seperti Logam Tanah Jarang (LTJ). Sinergi kementerian dan lembaga dalam riset berbasis LTJ diharapkan menumbuhkan industri berbasis LTJ sehingga meningkatkan daya saing regional.

### **Implikasi Penerapan Sistem Baru yang akan Diatur dalam Undang-Undang atau Peraturan Daerah Terhadap Aspek Kehidupan Masyarakat dan Dampaknya Terhadap Aspek Beban Keuangan Negara**

Target bauran energi merupakan realisasi dari program prioritas pengembangan energi yang ditetapkan dalam KEN. Program prioritas tersebut adalah memaksimalkan penggunaan energi terbarukan, sehingga porsi EBT paling sedikit 23% pada tahun 2025 dan paling sedikit 31% pada tahun 2050. Sedangkan minyak bumi, KEN mengamanatkan untuk meminimalkan penggunaannya, sehingga porsi minyak bumi paling banyak 25% pada tahun 2025 dan paling banyak 20% pada tahun 2050.

Akan tetapi gas bumi diamanatkan untuk digunakan secara optimum sehingga pemanfaatan gas bumi paling sedikit 22% pada tahun 2025, dan paling sedikit 24% pada tahun 2050. Setelah energi terbarukan dimanfaatkan secara maksimum, minyak bumi ditekan penggunaannya sampai minimum, dan gas bumi digunakan secara optimum, kekurangan kebutuhan energi akan dipasok dari batubara. Namun demikian, untuk memenuhi target energi baru dan energi terbarukan (EBT) yang sebesar 23% pada tahun 2025 menjadi sangat berat, mengingat laju pemanfaatan EBT yang demikian lambat oleh karena berbagai faktor, terutama dari faktor keekonomiannya.

Seberapa besar kesenjangan (*gap*) yang harus dipenuhi oleh energi nuklir untuk mengisi kekurangan energi sekaligus memenuhi target pemenuhan 23% pada tahun 2025, diuraikan berdasarkan hasil kajian Kementerian ESDM sebagai berikut:

Menurut perhitungan, pada tahun 2025 bauran energi akan menjadi: Batubara sebesar 58,94%, Gas sebesar 16,71%, Panas Bumi sebesar 10,99%, Tenaga Air sebesar 5,13%, Nuklir sebesar 6,32%, BBM sebesar 1,51%, Biomass sebesar 0,17%, Surya/Hibrid sebesar 0,15%, dan Impor sebesar 0,08%; Sementara perhitungan lain yang berupa *exercise* untuk menguji pemenuhan target energi baru terbarukan oleh PLN dalam pemenuhan RUPTL (Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik) disampaikan bahwa jika dipaksakan dipenuhi oleh EBT non-nuklir, maka beban biaya ekonomi tinggi bisa jadi akan dipikul oleh masyarakat oleh karena ongkos pengembangan EBT yang masih relatif tinggi, sehingga hal ini perlu dihindari. Nuklir yang masuk dalam kategori energi baru diharapkan mampu memberikan solusi pemenuhan target tersebut, oleh karena sifat energi nuklir yang masif, berdaya besar dan teknologinya sudah tersedia dan terbukti. Perhitungan tersebut memberikan gambaran bahwa energi nuklir semestinya menjadi solusi pemenuhan target tersebut.

Namun begitu, oleh karena infrastruktur regulasi dan kebijakan yang ada belum sepenuhnya kondusif dan belum mendorong untuk implementasi pembangunan energi nuklir, maka perlu adanya kajian mendalam yang dituangkan kedalam suatu naskah akademik.

Jika prinsip-prinsip global pengelolaan sumber daya alam dan lingkungan diintegrasikan ke dalam instrumen hukum nasional, maka substansi peraturan perundang-undangan harus melibatkan beberapa hal berikut:

- Pengelolaan SDAL dilakukan untuk menjamin kelestarian dan berkelanjutan
- Menggunakan pendekatan terintegrasi dan dilakukan secara komprehensif
- Mengatur mekanisme koordinasi dan keterpaduan antar sektor
- Pengelolaan SDAL yang berbasis masyarakat
- Pengelolaan SDAL dilakukan sesuai dengan karakter wilayah
- Mengatur mekanisme pengawasan dan akuntabilitas pengelola SDAL

### **Evaluasi Dan Analisis Peraturan Perundang-Undangan Energi**

Program perencanaan energi mulai difokuskan pada tahun 2002 sejalan dengan semakin stabilnya kondisi politik dan ekonomi pasca krisis tahun 1997 dan kenyataan bahwa permintaan listrik terus meningkat dengan rata-rata sekitar 7% per tahun. Hal ini kemudian mendorong pemerintah menerbitkan Peraturan Pemerintah Nomor 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional (KEN). Dalam PP tersebut ditetapkan bahwa sampai dengan tahun 2025 proyeksi kebutuhan listrik secara nasional akan mencapai 115 GWe. Selain itu, PP juga telah menetapkan penggunaan sumber EBT hingga 23% untuk mengurangi penggunaan sumberdaya energi fosil, terutama minyak dan batubara yang masih mendominasi sebagai pembangkit listrik.

Di antara 23% sumber EBT tersebut diproyeksikan energi nuklir dapat berkontribusi dalam memenuhi kebutuhan listrik secara nasional. Kebijakan Energi Nasional juga diperkuat oleh Undang-Undang Nomor 17 Tahun 2007 tentang Rencana Pembangunan Jangka Panjang Nasional (RPJPN) tahun 2005-2025. Berdasarkan undang-undang tersebut iptek nuklir bidang energi seharusnya dimanfaatkan pada tahun 2015-2019 (RPJMN III) dengan mempertimbangkan faktor keselamatan secara ketat.

Kebijakan tersebut belum menghasilkan perubahan yang berarti dalam mencapai kondisi keenergian yang positif. Permasalahan implementasi, koordinasi dan payung regulasi masih menjadi kendala utama. Melihat kondisi yang demikian, pada tahun 2007 pemerintah bersama DPR mengesahkan Undang-Undang Nomor 30 Tahun 2007 tentang Energi, yang salah satu amanatnya adalah menyusun KEN yang dirumuskan oleh Dewan Energi Nasional (DEN) dan ditetapkan Pemerintah setelah mendapat persetujuan DPR. KEN ini akan menjadi pedoman bagi Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) dan Rencana Umum Energi Daerah (RUED). Walaupun demikian beberapa daerah telah menyusun rancangan RUED. Isu strategis dalam semua proses tersebut di atas adalah keselarasan antara ketiga produk tersebut. Hal ini akan menentukan keberhasilan implementasi kebijakan energi di masa mendatang.

Kebutuhan energi diperkirakan terus mengalami peningkatan sebagai konsekuensi pertumbuhan ekonomi dan perkembangan jumlah penduduk. Oleh karena itu pengelolaan energi dilaksanakan dengan sebaik-baiknya agar dapat memenuhi jaminan pasokan energi baik untuk kebutuhan saat ini maupun di masa mendatang.

### **Landasan Yuridis**

Dalam perkembangannya, pelaksanaan litbang, penerapan dan pemanfaatan iptek nuklir di Indonesia telah berlandaskan pada peraturan perundang-undangan yang ada dari landasan filosofis sampai dengan peraturan yang lebih teknis dan operasional, dan terus dibuat peraturan baru sesuai dengan kebutuhan.

Berikut peraturan perundang-undangan penting yang digunakan sebagai landasan/dasar hukum dalam penyusunan terkait arah kebijakan program nuklir, antara lain:

1. Undang-Undang Dasar Negara Republik Indonesia Tahun 1945 (Amandemen empat kali);
2. Undang-Undang Nomor 10 Tahun 1997 tentang Ketenaganukliran;
3. Undang-Undang Nomor 18 Tahun 2002 tentang Sistem Nasional Penelitian, Pengembangan dan Penerapan Ilmu Pengetahuan dan Teknologi;
4. Undang-Undang Nomor 17 Tahun 2007 tentang Rencana Pembangunan Jangka Panjang Nasional (RPJPN) 2005-2025;
5. Undang-Undang Nomor 30 Tahun 2007 tentang Energi;

6. Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup;
7. Peraturan Pemerintah Nomor 61 Tahun 2013 tentang Pengelolaan Limbah Radioaktif;
8. Peraturan Pemerintah Nomor 2 Tahun 2014 tentang Perizinan Instalasi Nuklir dan Pemanfaatan Bahan Nuklir;
9. Peraturan Pemerintah Nomor 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional;
10. Peraturan Pemerintah Nomor 14 Tahun 2015 tentang Rencana Induk Pembangunan Industri Nasional Tahun 2015 – 2035.
11. Peraturan Presiden Nomor 46 Tahun 2013 tentang Badan Tenaga Nuklir Nasional;
12. Peraturan Presiden Nomor 2 Tahun 2015 tentang Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional Tahun 2015 - 2019.
13. Peraturan Presiden Nomor 22 Tahun 2016 tentang Rencana Umum Energi Nasional (RUEN).

## KESIMPULAN

Kebijakan strategis nuklir di bidang energi ke depan harus difokuskan untuk mengatasi kendala dan tantangan yang ada, serta upaya mewujudkannya dengan menyusun peta jalan (*roadmap*) pencapaian secara bertahap melalui bidang fokus sebagai berikut: (1), perlu dilakukan studi yang lebih mendalam dan komprehensif terhadap ketersediaan berbagai sumberdaya energi yang ada di wilayah Indonesia, termasuk sumberdaya energi nuklir, untuk mengetahui seberapa besar potensinya sebagai pembangkit listrik dalam jangka panjang, disesuaikan dengan proyeksi pertumbuhan penduduk dan ekonomi; (2), perlu dilakukan pemberian informasi yang lebih lengkap tentang aspek risiko, manfaat, dampak sosial dan ekonomi pembangunan PLTN kepada masyarakat luas. Informasi yang disampaikan perlu didukung dengan data yang lengkap tentang perkembangan pemanfaatan PLTN di negara-negara lain, termasuk dampak sosial dan ekonomi yang sudah dapat dirasakan; (3), perlu mendorong partisipasi aktif kelompok industri nasional dalam meningkatkan kemampuan dalam memproduksi dan menyediakan komponen PLTN untuk menuju kemandirian dalam jangka panjang. Pengalaman di negara yang sudah banyak memanfaatkan PLTN sangat banyak melibatkan *stakeholder* lain sebagai pemasok, termasuk industri mekanik, elektrik dan konstruksi, dan lain-lain; (4), perlu dilakukan studi yang mendalam terhadap potensi bencana yang ada di wilayah Indonesia untuk mencari lokasi yang aman bagi pembangunan PLTN. Kegiatan studi harus dilakukan oleh Kementerian teknis dengan melibatkan para ahli yang kompeten untuk mendapatkan hasil dengan tingkat akurasi tinggi; (5) Perlu dilakukan studi model pendanaan yang sesuai untuk pembiayaan pembangunan PLTN. Studi harus dilakukan secara komprehensif dengan melibatkan Badan Usaha Milik Negara dan konsorsium industri dalam negeri untuk mengetahui seberapa besar kemampuan pendanaan di dalam negeri sebelum ditawarkan kepada investor asing. Hal ini perlu dilakukan untuk mengurangi ketergantungan pada investor asing.

## REKOMENDASI

Rekomendasi untuk para pengambil kebijakan adalah (1) meningkatkan keyakinan para pengambil keputusan (*decision maker*) terhadap keandalan dan keamanan teknologi nuklir. (2) Meningkatkan kemampuan industri nasional dalam memasok komponen PLTN. (3) Meningkatkan kemampuan pendanaan. (4) Meningkatkan penyiapan sumber daya manusia terkait penguasaan teknologi. (5) Meningkatkan keberterimaan masyarakat terhadap penggunaan nuklir sebagai pembangkit listrik. (6) Perlunya adanya kebijakan pedoman yang memberikan arah pengembangan energi nuklir yang akan dicapai dalam jangka tertentu, agar pengembangan energi nuklir lebih terarah, berdaya guna, dan berhasil guna.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada kepala Biro Perencanaan Bapak Ir. Ferly Hermana, MM dan Kepala Bagian Perencanaan Program Bapak M. Busthomi, S.Si yang telah mengijinkan untuk melakukan kajian ini. Selain itu penulis juga ingin mengucapkan terima kasih kepada responden wawancara di Tim Blue Print BATAN serta rekan-rekan di Bagian Perencanaan Program khususnya rekan-rekan Fungsional Perencana atas segala bantuan, motivasi serta dukungan, hingga selesainya makalah ini.

#### DAFTAR PUSTAKA

1. Peraturan Pemerintah Nomor 79 tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional
2. Undang-undang Nomor 17 Tahun 2007 tentang Rencana Pembangunan Jangka Panjang Nasional (RPJPN).
3. Nugroho, Riant, Dr, *Public Policy*, Edisi Keempat, revisi 2012 Penerbit PT Elex Media Komputindo, Jakarta.
4. Dunn, William N. 2004 (1981), *Public Policy Analysis : An Introduction*, New Jersey: Pearson Education. Edisi Bahasa Indonesia diterjemahkan dari edisi kedua (1994) diterbitkan sejak 1999 dengan judul Pengantar Analisis Kebijakan Publik. Yogyakarta: Gajahmada University Press.
5. Irwanti, Dwi, Analisis Perencanaan Strategis dengan Prespektif SWOT dalam Rangka Implementasi Reformasi Birokrasi di Badan Tenaga Nuklir Nasional, Jurnal Pascasarjana Departemen Ilmu Administrasi FISIP UI, Jakarta (2014).
6. Wheelen, T.L. and Hunger, D.J., (2010). *Strategic management and business policy. Achieving sustainability*, 12th Edition, New Jersey: Prentice – Hall.
7. Sugiyono, "Metode Penelitian Kombinasi (*Mixed Methods*)", cetakan pertama, Alfabeta, Bandung (2011)
8. <https://www.iaea.org/pris/>, diakses Desember 2016
9. <https://www.iaea.org/pris/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=CN>, diakses Desember 2016
10. Nuclear Infrastructure Development in Indonesia, BATAN (2011)
11. IAEA Nuclear Energy Series. No. NG-G-3.1 (Rev 1). *Milestone in the Development of a National Infrastructure for Nuclear Power*. Vienna (2015)
12. Nugroho, Hanan, *A Mosaic of Indonesian Energy Policy, first edition*: Mei 2011, PT. Penerbit IPB Press.

#### DISKUSI/TANYA JAWAB :

##### 1. PERTANYAAN :

Bagaimana cara meyakinkan ke pemerintah maupun masyarakat bahwa energi nuklir ini aman dan bersih?

##### JAWABAN :

Operasional pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) tidak menggunakan SO<sub>x</sub>NO<sub>x</sub> dan CO<sub>2</sub> tidak seperti bahan bakar fosil ....penggunaan PLTN mengurangi dampak lingkungan. Diteknologi PLTN selalu mengikuti perkembangan teknologi sistem keselamatan dengan adanya reaktor generasi I, II, III, dan IV.

## PROYEKSI BEBAN HARIAN SISTEM KELISTRIKAN MATARAM DENGAN MENGUNAKAN BATASAN SIMPANGAN BAKU

Wiku Lulus Widodo<sup>1)</sup>, Rizki Firmansyah SB<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Pusat Kajian Sistem Energi Nuklir, BATAN

<sup>2)</sup>Pasca Sarjana Teknik Elektro, UGM

[wikululu@batan.go.id](mailto:wikululu@batan.go.id)

### ABSTRAK

**PROYEKSI BEBAN HARIAN SISTEM KELISTRIKAN MATARAM DENGAN MENGGUNAKAN BATASAN SIMPANGAN BAKU.** Telah dilakukan studi proyeksi beban hari sistem kelistrikan Mataram dengan menggunakan metode batasan untuk mengantisipasi fluktuatif beban pada sistem kelistrikan. Tujuan dari studi ini adalah untuk melihat karakter beban harian dari sistem tersebut sehingga bermanfaat untuk melakukan optimasi dalam penentuan pembangkit yang harus beroperasi sekaligus untuk perencanaan pemilihan jenis pembangkit di masa mendatang. Rentang fluktuatif dihitung dengan menggunakan nilai simpangan baku dari data riil beban harian sistem kelistrikan Mataram tahun 2017. Batas bawah dan batas atas dari fluktuatif dalam studi ini ditetapkan dengan nilai dua kali dari simpangan baku terhadap nilai rerata dari data riil beban harian. Beban harian dalam studi ini dibagi dalam empat area waktu yaitu jam pagi (02.00-06.00), jam kerja (06.00-18.00), jam puncak (18.00-22.00), dan jam malam (22.00-02.00). Hasil perhitungan simpangan baku untuk setiap area waktu (jam pagi, jam kerja, jam puncak & jam malam) adalah sebagai berikut, hari Minggu : 2,86 MW, 2,87 MW, 3,03 MW & 5,30 MW; Senin: 4,17 MW, 4,81 MW, 3,89 MW & 4,99 MW; Selasa : 3,73 MW, 4,42 MW, 4,66 MW & 5,74 MW; Rabu : 3,36 MW, 4,72 MW, 4,15 MW & 6,53 MW; Kamis : 3,66 MW, 4,34 MW, 4,95 MW & 5,95 MW; Jumat : 2,80 MW, 4,13 MW, 3,54 MW & 6,08 MW; Sabtu : 3,73 MW, 3,59 MW, 3,66 MW & 5,06 MW. Kesimpulan yang diperoleh adalah fluktuatif beban listrik pada hari kerja lebih besar jika dibandingkan pada hari libur sabbtu dan minggu, hal ini menjadi indikator bahwa konsumen listrik masih didominasi sektor pemukiman.

Kata kunci : proyeksi, beban harian, sistem kelistrikan Mataram, simpangan baku

### ABSTRACT

**DAILY LOAD PROJECTION OF MATARAM ELECTRICITY SYSTEM USING STANDARD DEVIATION BOUNDARY.** A study has been carried out on the day load of the Mataram electrical system using the boundary method to anticipate the uncertainty of load on the electrical system. The purpose of this study is to calculate the character of the daily load of the system so that it is useful for optimizing the determination of power plants that must operate and selected in future. The uncertainty range is calculated using the standard deviation value of the Mataram electricity system's real daily load data in 2017. The lower limit and upper limit of the uncertainty in this study are set at twice the standard deviation to the average value of the real daily load data. Daily expenses in this study are divided into four time areas, namely morning hours (02.00-06.00), working hours (06.00-8.00), peak hours (18.00-22.00), and night hours (22.00-02.00). The results of the standard deviation calculation for each area of time (morning hours, working hours, peak hours & curfews) are as follows, Sunday: 2.86 MW, 2.87 MW, 3.03 MW & 5.30 MW; Monday: 4.17 MW, 4.81 MW, 3.89 MW & 4.99 MW; Tuesday: 3.73 MW, 4.42 MW, 4.66 MW & 5.74 MW; Wednesday: 3.36 MW, 4.72 MW, 4.15 MW & 6.53 MW; Thursday: 3.66 MW, 4.34 MW, 4.95 MW & 5.95 MW; Friday: 2.80 MW, 4.13 MW, 3.54 MW & 6.08 MW; Saturday: 3.73 MW, 3.59 MW, 3.66 MW & 5.06 MW. The conclusion obtained is uncertainty for the electricity load on working days is greater than on Saturday and Sunday holidays, this is an indicator that electricity consumers are still dominated by the resident sector.

Keywords: projection, daily load, Mataram electrical system, standard deviation

### PENDAHULUAN

Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisa karakter konsumen listrik di NTB khususnya pada wilayah jaringan kelistrikan Mataram NTB. Pada umumnya karakter dari suatu sistem merupakan kondisi keberulangan (repeateness) dari sistem tersebut[1][2]. Kondisi keberulangan dapat diamati secara langsung dengan melihat statistik keberulangan.

Metode penetapan standar deviasi untuk menganalisa fluktuatif beban listrik merupakan salah satu metode yang digunakan untuk menganalisa karakter konsumen listrik.

Pemanfaatan metode penetapan standar deviasi untuk menganalisa fluktuatif beban listrik di sistem jaringan kelistrikan Mataram NTB menjadi sangat bermanfaat karena sangat efektif untuk memahami karakter konsumen listrik. Metode ini dapat digunakan untuk melihat besarnya fluktuatif beban harian, sehingga dapat diketahui berapa besar kapasitas pembangkit yang harus disiapkan untuk mengantisipasi fluktuatif beban tersebut[3][4]. Penetapan batas atas dan batas bawah untuk area ketidakpastian pada umumnya didasarkan pada kelipatan dari nilai standar deviasi bergantung pada obyek yang dianalisa dan keakuratan hasil analisa tersebut[5][6].

Karakter konsumen listrik pada akhirnya akan membentuk karakter beban beserta durasinya. Durasi beban listrik tersebut akan menunjukkan seberapa besar porsi beban dasar, porsi beban menengah dan porsi beban puncak[7,8]. Informasi karakter beban beserta durasinya dapat digunakan dalam analisa perencanaan energi kelistrikan di suatu daerah, dalam rangka untuk menentukan jenis pembangkit yang optimal baik dalam aspek biaya maupun kestabilan[9,10]. Dengan demikian pemanfaatan metode penetapan standar deviasi untuk menganalisa karakter konsumen listrik menjadi sangat penting dan bermanfaat untuk membantu dalam melakukan perencanaan energi kelistrikan di suatu wilayah.

Nusa Tenggara Barat (Indonesia: Nusa Tenggara Barat - NTB) adalah sebuah provinsi di Indonesia. Ini terdiri dari bagian barat Kepulauan Sunda Kecil, dengan pengecualian Bali yang merupakan provinsi sendiri. Mataram, di Lombok, adalah ibu kota dan kota terbesar di provinsi ini. Sensus 2010 mencatat populasi penduduk berjumlah 4.496.855 jiwa, perkiraan terbaru untuk Desember 2017 adalah 4,702,389[11,12]. Total luas wilayah provinsi NTB adalah 19,708.79 km<sup>2</sup> dimana dua pulau terbesar di provinsi ini adalah Lombok di barat dan pulau Sumbawa yang lebih besar di timur. Pulau Flores dan Sumba adalah bagian dari Nusa Tenggara Timur[13].

Secara kemampuan daya, kondisi kelistrikan NTB berstatus surplus. Lombok dengan beban puncak 145.0 (MW) memiliki kemampuan daya sebesar 160,5 (MW), Sumbawa dengan beban puncak 29,3 (MW) memiliki kemampuan daya sebesar 34,2 (MW), Bima dengan beban puncak 28,5 (MW) memiliki kemampuan daya sebesar 32,6 (MW) dan Gili Trawangan dengan beban puncak 1,3 (MW) memiliki kemampuan daya sebesar 1,64 (MW). Namun di wilayah NTB, rasio elektrifikasi sampai tahun 2016 baru 52,85 % yang berarti 48,15 % atau sebagian besar penduduknya belum menikmati listrik. Jumlah pelanggan PLN NTB saat ini tercatat sebanyak 394 ribu rumah tangga dan industri[14].

Pembahasan dalam studi ini meliputi latar belakang dan tujuan studi, teori tentang faktor beban dan standar deviasi, metodologi untuk memperoleh hasil beserta analisisnya, dan pembahasan terhadap hasil perhitungan standar deviasi dari beban harian sistem kelistrikan Mataram NTB yang dilanjutkan dengan kesimpulan dan saran.

## **DASAR TEORI**

### **Faktor beban**

Faktor beban adalah perbandingan antara besarnya beban rata-rata untuk selang waktu tertentu terhadap beban puncak tertinggi dalam selang waktu yang sama (misalnya satu hari atau satu bulan)[15][16]. Sedangkan beban rata-rata untuk suatu selang waktu tertentu adalah jumlah produksi kWh dalam selang waktu tersebut dibagi dengan jumlah jam dari selang waktu tersebut.

$$\text{faktor beban} = \text{beban rata-rata} / \text{beban puncak}$$

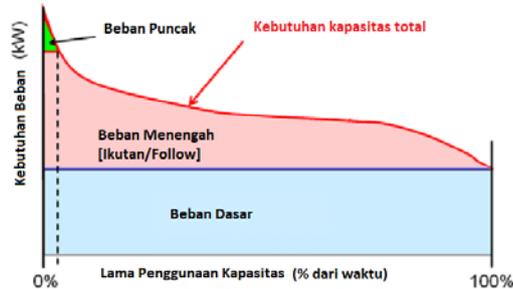
bagi penyedia listrik, faktor beban sistem diinginkan setinggi mungkin karena faktor beban yang makin tinggi berarti makin rata beban sistemnya, sehingga tingkay pemanfaatan alat-alat yang ada dalam sistem tersebut dapat diusahakan setinggi mungkin.

### **LDC**

Kurva durasi beban menggambarkan variasi dari beban tertentu dalam bentuk ke bawah sehingga beban terbesar diplot di sebelah kiri dan yang terkecil di sebelah kanan. Pada sumbu waktu, durasi waktu untuk setiap beban tertentu berlanjut selama hari diberikan[17]. Ada beberapa fakta tentang LDC yang dapat diringkas sebagai:

1. LDC adalah pengaturan dari semua tingkat beban dalam urutan besaran menurun.
2. Area di bawah LDC mewakili energi yang diminta oleh sistem (dikonsumsi).
3. Dapat digunakan dalam pengiriman ekonomi, perencanaan sistem dan evaluasi keandalan.
4. Lebih mudah untuk menganalisa daripada menggunakan kurva beban saja.

Sebuah kurva durasi beban (LDC) digunakan dalam pembangkit tenaga listrik untuk menggambarkan hubungan antara kebutuhan kapasitas pembangkit dan pemanfaatan kapasitas[18]. LDC mirip dengan kurva beban tetapi data permintaan diurutkan dalam urutan besaran menurun, bukan secara kronologis. Kurva LDC menunjukkan persyaratan penggunaan kapasitas untuk setiap kenaikan beban. Tinggi setiap irisan adalah ukuran kapasitas, dan lebar setiap irisan adalah ukuran tingkat pemanfaatan atau faktor kapasitas. Gambar kurva durasi beban ditunjukkan pada gambar 1.



Gambar 1. Kurva Durasi Beban

### Standar Deviasi

Standar deviasi adalah nilai statistik yang digunakan untuk menentukan bagaimana sebaran data dalam sampel, dan seberapa dekat titik data individu ke rata-rata (mean) [19][20]. Rumus standar deviasi ditunjukkan pada persamaan 1.

$$s = \sqrt{\frac{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n(n-1)}} \quad \text{Atau} \quad s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1)$$

Keterangan:

s : Standar deviasi

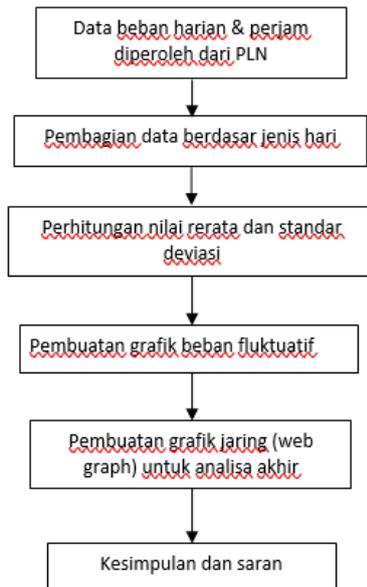
xi : Nilai x ke-i

$\bar{x}$  : Rata-rata

n : Ukuran sampel

### METODOLOGI

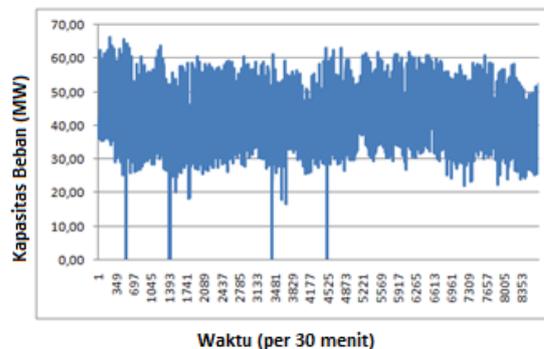
Metodologi yang digunakan dalam analisa konsumen listrik untuk kelayakan PLTN di NTB diawali dengan melakukan koordinasi dengan pihak PLN cabang NTB khususnya sistem jaringan Mataram. Koordinasi tersebut bertujuan untuk mendapatkan data kurva beban selama minimal 6 bulan. Tahapan metodologi untuk analisa ini ditunjukkan pada gambar 2. Metode penetapan standar deviasi yang digunakan untuk menghitung fluktuatif beban harian yang dipisahkan berdasarkan jenis hari dari mulai hari minggu hingga hari sabtu. Pembuatan grafik dilakukan dengan mengkombinasi antara nilai rerata yang di tambah dengan nilai fluktuatif sebesar dua kali standar deviasi. Grafik analisa akhir dilakukan dengan membuat grafik jaring (*web graph*) yang menunjukkan seluruh nilai standar deviasi dari keseluruhan jenis hari dan jenis jam dalam harian[21]. Pembagian jenis jam dalam harian ditetapkan menjadi 4 waktu yaitu jam pagi, jam kerja, jam puncak dan jam malam.



Gambar 2. Metodologi untuk menganalisa karakter konsumen listrik dengan metode Standar Deviasi

### HASIL DAN PEMBAHASAN

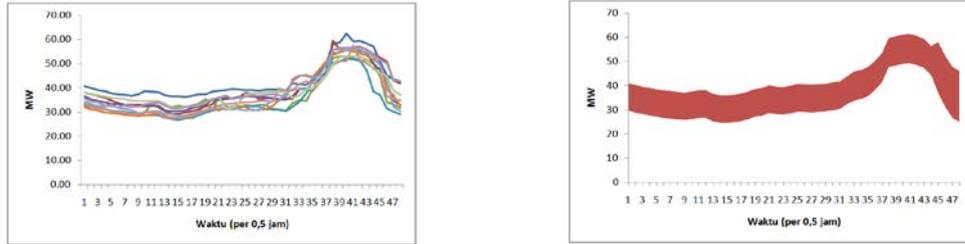
Data beban harian untuk setiap 30 menit (setengah jam) yang diperoleh dari laporan tahunan PT PLN sistem kelistrikan Mataram NTB ditunjukkan pada gambar 3. Berdasarkan gambar tersebut secara statistik beban berfluktuatif antara 20 MW hingga 65 MW. Terjadi beberapa kondisi dimana beban bernilai nol yang menunjukkan adanya *blackout* pada sistem tersebut.



Gambar 3. Data beban harian sistem kelistrikan Mataram NTB dengan periode 0,5 jam

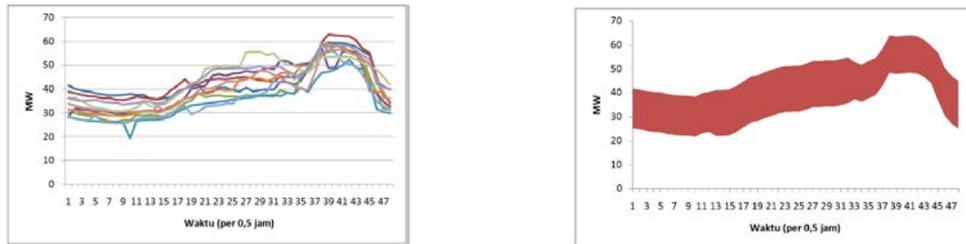
Data beban harian sistem kelistrikan Mataram NTB dipisahkan berdasarkan jenis harian dari hari minggu hingga hari sabtu. Jumlah sampel yang digunakan dalam analisis ini dibatasi 10 data harian dengan asumsi sudah dapat untuk menganalisa pola hariannya. Perhitungan standar deviasi dan rata-rata dilakukan untuk setiap beban perwaktunya (per 0,5 jam). Standar deviasi rata-rata harian akan dihitung berdasarkan rata-rata dari keseluruhan beban perwaktunya. Ketidak pastian beban ditetapkan sebesar dua kali standar deviasi dengan asumsi telah mencakup 80% dari jumlah populasi sampel.

Data sampel untuk beban hari minggu ditunjukkan pada gambar 4a. Berdasarkan rentang data tersebut diperoleh hasil perhitungan standar deviasi jam pagi sebesar 2,86 MW, jam kerja sebesar 2,87MW, jam puncak sebesar 3,03MW dan jam malam sebesar 5,30 MW. Standar deviasi untuk jam puncak dan jam malam relatif lebih tinggi, hal ini menunjukkan fluktuatif beban yang lebih besar pada jam puncak dan jam malam. Pembangkit yang harus berfungsi untuk penyangga fluktuatif di hari minggu harus mampu mengantisipasi sebesar empat kali standar deviasi yaitu sekitar 20 MW hingga 22 MW. Hasil analisa beban harian untuk hari minggu dengan mempertimbangkan ketidakpastian akibat fluktuatif beban ditunjukkan pada gambar 4b.



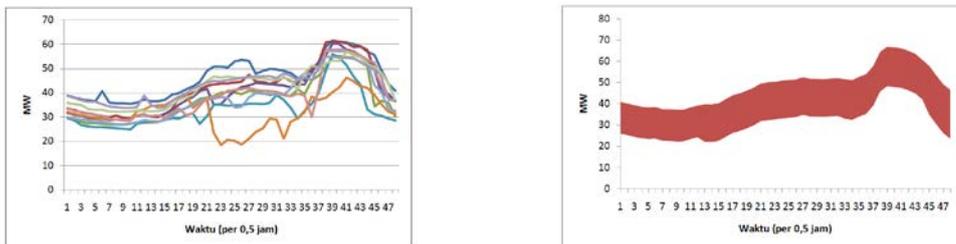
Gambar 4. Grafik beban harian untuk hari minggu; a) Data beban harian; b) fluktuasi sebesar +/- 2x Standar Deviasi

Data sampel untuk beban hari senin ditunjukkan pada gambar 5a. Berdasarkan rentang data tersebut diperoleh hasil perhitungan standar deviasi jam pagi sebesar 4,17 MW, jam kerja sebesar 4,81 MW, jam puncak sebesar 3,89 MW dan jam malam sebesar 4,99 MW. Standar deviasi untuk jam kerja dan jam malam relatif lebih tinggi, hal ini menunjukkan fluktuatif beban yang lebih besar pada jam kerja dan jam malam. Pembangkit yang harus berfungsi untuk penyangga fluktuatif di hari senin harus mampu mengantisipasi sebesar empat kali standar deviasi yaitu sekitar 20 MW. Hasil analisa beban harian untuk hari senin dengan mempertimbangkan ketidakpastian akibat fluktuatif beban ditunjukkan pada gambar 5b.



Gambar 5. Grafik beban harian untuk hari senin; a) Data beban harian; b) fluktuasi sebesar +/- 2x Standar Deviasi

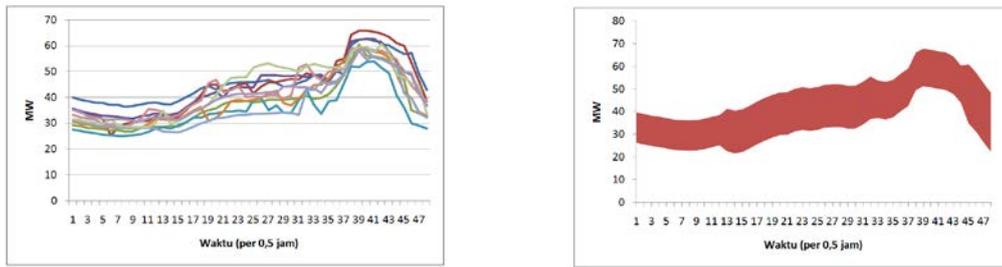
Data sampel untuk beban hari selasa ditunjukkan pada gambar 6a. Berdasarkan rentang data tersebut diperoleh hasil perhitungan standar deviasi jam pagi sebesar 3,73 MW, jam kerja sebesar 4,42 MW, jam puncak sebesar 4,66 MW dan jam malam sebesar 5,74 MW. Standar deviasi untuk jam puncak dan jam malam relatif lebih tinggi, hal ini menunjukkan fluktuatif beban yang lebih besar pada jam puncak dan jam malam. Pembangkit yang harus berfungsi untuk penyangga fluktuatif di hari selasa harus mampu mengantisipasi sebesar empat kali standar deviasi yaitu sekitar 23 MW. Hasil analisa beban harian untuk hari selasa dengan mempertimbangkan ketidakpastian akibat fluktuatif beban ditunjukkan pada gambar 6b.



Gambar 6. Grafik beban harian untuk hari selasa; a) Data beban harian; b) fluktuasi sebesar +/- 2x Standar Deviasi

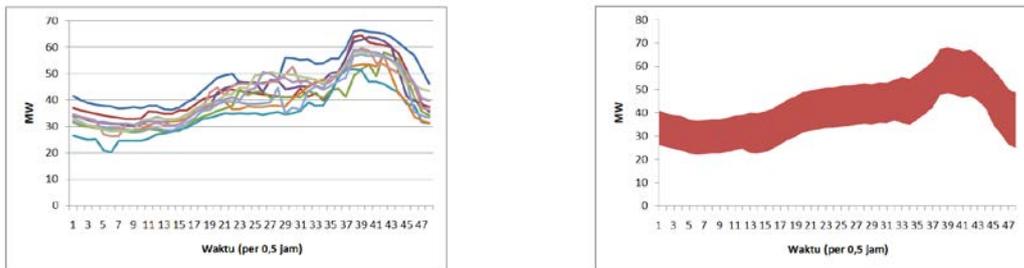
Data sampel untuk beban hari rabu ditunjukkan pada gambar 7a. Berdasarkan rentang data tersebut diperoleh hasil perhitungan standar deviasi jam pagi sebesar 3,36 MW, jam kerja sebesar 4,72 MW, jam puncak sebesar 4,15 MW dan jam malam sebesar 6,53 MW. Standar deviasi untuk jam kerja dan jam malam relatif lebih tinggi, hal ini menunjukkan fluktuatif beban yang lebih besar pada jam kerja dan jam malam. Pembangkit yang harus berfungsi untuk penyangga fluktuatif di hari rabu harus mampu mengantisipasi

sebesar empat kali standar deviasi yaitu sekitar 27 MW. Hasil analisa beban harian untuk hari rabu dengan mempertimbangkan ketidakpastian akibat fluktuatif beban ditunjukkan pada gambar 7b.



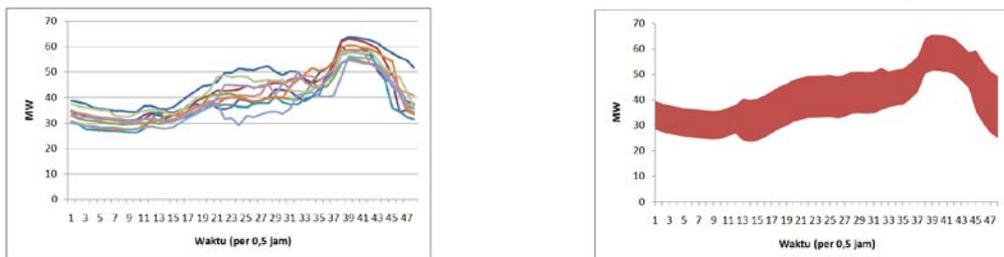
Gambar 7. Grafik beban harian untuk hari Rabu; a) Data beban harian; b) fluktuasi sebesar +/- 2x Standar Deviasi

Data sampel untuk beban hari Kamis ditunjukkan pada gambar 8a. Berdasarkan rentang data tersebut diperoleh hasil perhitungan standar deviasi jam pagi sebesar 3,66 MW, jam kerja sebesar 4,34 MW, jam puncak sebesar 4,95 MW dan jam malam sebesar 5,95 MW. Standar deviasi untuk jam puncak dan jam malam relatif lebih tinggi, hal ini menunjukkan fluktuatif beban yang lebih besar pada jam puncak dan jam malam. Pembangkit yang harus berfungsi untuk penyangga fluktuatif di hari Kamis harus mampu mengantisipasi sebesar empat kali standar deviasi yaitu sekitar 24 MW. Hasil analisa beban harian untuk hari Kamis dengan mempertimbangkan ketidakpastian akibat fluktuatif beban ditunjukkan pada gambar 8b.



Gambar 8. Grafik beban harian untuk hari Kamis; a) Data beban harian; b) fluktuasi sebesar +/- 2x Standar Deviasi

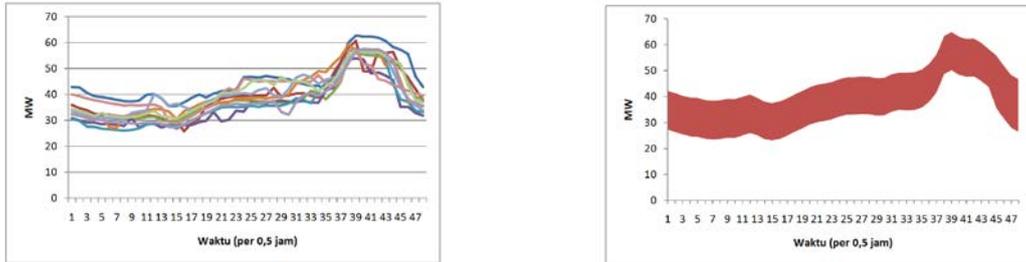
Data sampel untuk beban hari Jumat ditunjukkan pada gambar 9a. Berdasarkan rentang data tersebut diperoleh hasil perhitungan standar deviasi jam pagi sebesar 2,80 MW, jam kerja sebesar 4,13 MW, jam puncak sebesar 3,54 MW dan jam malam sebesar 6,08 MW. Standar deviasi untuk jam kerja dan jam malam relatif lebih tinggi, hal ini menunjukkan fluktuatif beban yang lebih besar. Pembangkit yang harus berfungsi untuk penyangga fluktuatif di hari Jumat harus mampu mengantisipasi sebesar empat kali standar deviasi yaitu sekitar 25 MW. Hasil analisa beban harian untuk hari Jumat dengan mempertimbangkan ketidakpastian akibat fluktuatif beban ditunjukkan pada gambar 9b.



Gambar 9. Grafik beban harian untuk hari Jumat; a) Data beban harian; b) fluktuasi sebesar +/- 2x Standar Deviasi

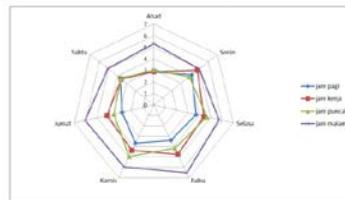
Data sampel untuk beban hari Sabtu ditunjukkan pada gambar 10a. Berdasarkan rentang data tersebut diperoleh hasil perhitungan standar deviasi jam pagi sebesar 3,73

MW, jam kerja sebesar 3,59 MW, jam puncak sebesar 3,66 MW dan jam malam sebesar 5,06 MW. Standar deviasi untuk jam puncak dan jam malam relatif lebih tinggi, hal ini menunjukkan fluktuatif beban yang lebih besar. Pembangkit yang harus berfungsi untuk penyangga fluktuatif di hari sabtu harus mampu mengantisipasi sebesar empat kali standar deviasi yaitu sekitar 21 MW. Hasil analisa beban harian untuk hari minggu dengan mempertimbangkan ketidakpastian akibat fluktuatif beban ditunjukkan pada gambar 10b.



Gambar 10. Grafik beban harian untuk hari sabtu; a) Data beban harian; b) fluktuasi sebesar  $\pm 2x$  Standar Deviasi

Pemetaan nilai fluktuatif beban harian untuk sistem kelistrikan Mataram NTB dalam bentuk standar deviasi ditunjukkan pada gambar 11. Fluktuatif beban untuk jam pagi relatif lebih besar pada hari senin dan relatif lebih kecil pada hari minggu. Fluktuatif beban untuk jam kerja relatif lebih besar pada hari senin dan rabu, fluktuatif beban relatif lebih kecil pada hari minggu. Fluktuatif beban untuk jam puncak relatif lebih besar pada hari selasa dan Kamis, fluktuatif beban relatif lebih kecil pada hari minggu. Fluktuatif beban untuk jam malam relatif lebih besar pada hari rabu, relatif lebih kecil pada hari sabtu, minggu dan senin.



Gambar 11. Grafik jaring (web graph) standar deviasi dari beban harian

Karakter konsumen listrik pada sistem kelistrikan Mataram NTB berdasarkan pemetaan fluktuatif tersebut menunjukkan bahwa pada hari kerja terjadi fluktuatif yang relatif lebih besar jika dibandingkan hari libur. Karakter konsumen ini menunjukkan bahwa konsumen listrik masih didominasi sektor pemukiman[22]. Besarnya fluktuatif beban pada jam kerja antar harian menunjukkan bahwa sektor industri belum terlalu signifikan jika dibanding sektor pemukiman.

## KESIMPULAN

Hasil perhitungan simpangan baku untuk setiap area waktu (jam pagi, jam kerja, jam puncak & jam malam) adalah sebagai berikut, hari Minggu : 2,86 MW, 2,87 MW, 3,03 MW & 5,30 MW; Senin: 4,17 MW, 4,81 MW, 3,89 MW & 4,99 MW; Selasa : 3,73 MW, 4,42 MW, 4,66 MW & 5,74 MW; Rabu : 3,36 MW, 4,72 MW, 4,15 MW & 6,53 MW; Kamis : 3,66 MW, 4,34 MW, 4,95 MW & 5,95 MW; Jumat : 2,80 MW, 4,13 MW, 3,54 MW & 6,08 MW; Sabtu : 3,73 MW, 3,59 MW, 3,66 MW & 5,06 MW.

Fluktuatif beban untuk jam pagi relatif lebih besar pada hari senin dan relatif lebih kecil pada hari minggu. Fluktuatif beban untuk jam kerja relatif lebih besar pada hari senin dan rabu, fluktuatif beban relatif lebih kecil pada hari minggu. Fluktuatif beban untuk jam puncak relatif lebih besar pada hari selasa dan Kamis, fluktuatif beban relatif lebih kecil pada hari minggu. Fluktuatif beban untuk jam malam relatif lebih besar pada hari rabu, relatif lebih kecil pada hari sabtu, minggu dan senin. Fluktuatif beban listrik pada hari kerja lebih besar jika dibandingkan pada hari libur sabtu dan minggu, hal ini menjadi indikator bahwa konsumen listrik masih didominasi sektor pemukiman. Besarnya fluktuatif beban pada jam kerja antar harian menunjukkan bahwa sektor industri belum terlalu signifikan jika dibanding sektor pemukiman.

## TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Dr Suparman sebagai Kepala pusat Kajian Infrastruktur yang telah mendukung studi analisa beban karakter sistem mahakam melalui anggaran kegiatan penyusunan buku INEO 2018.

## DAFTAR PUSTAKA

1. W. Ouweltjes et al," The repeatability of Individual nutrient digestibility in pigs", *Livestock Science* no.207 pp.63 – 67, 2018.
2. M.C. Fennema et al,"Repeatability of Measuring knee flexion angles with wearable inertial sensors", *The Knee* no.26 pp.97 - 105, 2018.
3. Abdolrahim Resaeiha et al,"Fluctuations of angle of attack and lift coefficient and the resultant fatigue loads for a large horizontal axis wind turbine", *Renewable energy* no.114 pp.904–916, 2017.
4. Manuel Jimenez et al,"Response time characterization of organic rankine cycle evaporators for dynamic regime analysis with fluctuating load", *Energy Procedia* no.129 pp.427–434, 2017.
5. Naik Aashay Rajan et al,"Solar PV array reconfiguration using the concept of standar deviation and genetic algorithm", *Energy Procedia* no.117 pp.1062–1069, 2017.
6. Zhenpo Wang et al,"Voltage Fault detection and precaution of batteries base on entropy and standard deviation for electric vehicles", *Energy Procedia* no.105 pp.2163–2168, 2017.
7. Yoosoon Changa, Chang Sik Kimb, J. Isaac Millerc, Joon Y. Parka, Sungkeun Park,"A new approach to modeling the effects of temperature fluctuations on monthly electricity demand", *Energy Economics* no.60 pp.206–216, 2016.
8. Nina Boogen, Souvik Datta, Massimo Filippini,"Dynamic models of residential electricity demand: Evidence from Switzerland", *Energy Strategy Reviews* no.18 pp.85-92, 2017.
9. Paul J. Burke, Sandra Kurniawati,"Electricity subsidy reform in Indonesia: Demand-side effects on electricity use", *Energy Policy* no.116 pp.410–421, 2018.
10. Lawrence L. Kuonski, "Estimation of electricity demand function for Algeria: Revisit of time series analysis", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* no.82 pp.4221–4234, 2018.
11. BPS,"Statistik Indonesia 2017," Badan Pusat Statistik, Jakarta, 2017.
12. BPS NTB,"Statistik Kependudukan Wilayah NTB 2017," Badan Pusat Statistik NTB, Mataram, 2017.
13. BPS NTB,"Kondisi Kewilayahan NTB", Badan Pusat Statistik NTB, Mataram, 2017.
14. PT PLN," RUPTL tahun 2017-2026", PT PLN, Jakarta, 2017.
15. Tarek N. Atalla, Lester C. Hunt,"Modelling residential electricity demand in the GCC countries", *Energy Economics* no.59 pp.149–158, 2016.
16. Hyojoo Son, Changwan Kim,"Short-term forecasting of electricity demand for the residential sector using weather and social variables", *Resources, Conservation and Recycling* no.123 pp.200–207, 2017.
17. Muhammad Arshad Khan, Faisal Abbas," The dynamics of electricity demand in Pakistan: A panel cointegration analysis", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* no.65 pp.1159–1178, 2016.
18. Ergun Yukseltan, Ahmet Yucekaya, Ayse Humeyra Bilge,"Forecasting electricity demand for Turkey: Modeling periodic variations and demand segregation", *Applied Energy* no.193 pp.287–296, 2017.
19. D. Baduri et al.,"An Investigation of accuracy, Repeatability and Reproducibility of Laser Micromachining System", *Journal of Measurement* no.88, pp.248-261, 2016.
20. R.Kapoor et al.,"Boosting Performance of Power Quality Event Identification with KL Divergence Measure & Standard Deviation", *Journal of Measurement* no.126 pp.134-142, 2018.
21. Yunzhi yan et al,"A generalization of the buckley-osthus model for web graphs", *Discrete Mathematics* no. 320 pp 73 – 86, 2014.
22. Massimo Filippinia, Bettina Hirla, Giuliano Masiero,"Habits and rational behaviour in residential electricity demand", *Resource and Energy Economics* no.52 pp.137–152, 2018.

## STATUS TERKINI MENGENAI PEMANFAATAN PLTN DI DUNIA DAN PROSPEK PEMBANGUNANNYA DI INDONESIA

Eri Hiswara<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi, Badan Tenaga Nuklir Nasional,  
Jalan Lebak Bulus Raya No.49, Jakarta Selatan 12070  
email: e.hiswara@batan.go.id

### ABSTRAK

**STATUS TERKINI MENGENAI PEMANFAATAN PLTN DI DUNIA DAN PROSPEK PEMBANGUNANNYA DI INDONESIA.** Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) telah mulai digunakan sejak tahun 1950an dan saat ini digunakan di 30 negara di dunia dengan jumlah 448 PLTN yang beroperasi di akhir tahun 2017 dan memiliki kapasitas pembangkitan listrik global sebesar 392 GW(e). Sebagian besar PLTN yang beroperasi tersebut berada di negara-negara industri. Meskipun beberapa negara mulai mengurangi kebergantungannya pada listrik yang dihasilkan oleh PLTN, kenyataannya sampai akhir Desember 2017 tercatat ada sebanyak 59 PLTN yang tengah dibangun. Berbeda dengan yang telah beroperasi, PLTN yang tengah dibangun sebagian besar berada di negara-negara Asia yang sedang berkembang. Dari sebanyak 30 negara yang mengoperasikan PLTN saat ini, 13 negara masih tengah membangun unit baru dan 9 negara diantaranya bahkan memiliki rencana untuk membangun unit baru. Dengan adanya 2 negara yang baru pertama kali membangun, dan beberapa negara lain yang tertarik untuk membangunnya, PLTN diperkirakan masih akan tetap menjadi sebagai sumber daya pembangkit listrik yang menarik. Di Indonesia, dengan sangat kuatnya kebergantungan keputusan pembangunan sumber daya energi pada politik massa, prospek pembangunan PLTN ini masih menjadi tanda tanya besar dan tampaknya akan sulit untuk diwujudkan kecuali ada terobosan yang sangat kuat dari pemerintah atau tekanan kebutuhan energi yang sangat besar yang memaksa PLTN harus digunakan.

Kata kunci: Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN), status terkini, prospek pembangunan

### ABSTRACT

**CURRENT STATUS OF THE UTILIZATION OF NUCLEAR POWER PLANT AND ITS PROSPECT TO BE BUILT IN INDONESIA** Nuclear Power Plants (NPPs) have been in use since the late 1950s and is currently used in 30 countries worldwide with 448 NPPs operating by the end of 2017 and has a global electricity generation capacity of 392 GW (e). Most of the operating nuclear power plants are in industrialized countries. Although some countries are beginning to reduce their dependence on electricity generated by nuclear power plants, the fact is that by the end of December 2016 there were still 59 NPPs under construction. In contrast to those already in operation, NPPs that are being built are largely in developing Asian countries. Of the 30 countries currently operating NPPs, 13 countries are still building new units and nine of them even have plans for building new unit(s). With the two newly built countries, and several other countries interested in building them, NPP is expected to remain as an attractive power generation resource. In Indonesia, with the very strong dependence of decision to build energy resources on mass politics, the prospect of building NPP is still a big question mark and it seems to be difficult to realize unless there is a very strong breakthrough from the government or the enormous energy demand pressure that forces the NPP to be used.

Keyword: Nuclear Power Plants (NPPs), current status, building prospect

### PENDAHULUAN

Selama bertahun-tahun, kebutuhan manusia akan energi, terutama energi listrik, dapat dipenuhi oleh sumber daya yang berasal dari minyak bumi. Namun demikian, dalam beberapa tahun terakhir ini telah timbul kesadaran bahwa minyak bumi tidak lagi dapat diandalkan sebagai sumber daya pembangkit listrik karena pemakaiannya yang berlimpah-limpah di masa lalu menyebabkan cadangannya menjadi menipis, dan diperkirakan akan segera habis dalam waktu sekitar 50 tahun ke depan. Sehubungan dengan hal ini manusia

telah mencoba mencari berbagai alternatif sumber energi yang lain untuk dapat menggantikan peran minyak bumi, atau paling tidak untuk mengurangi beban penggunaannya.

Dalam pada itu disadari pula bahwa kebutuhan akan energi akan terus berlanjut, dan juga akan terus meningkat seiring dengan meningkatnya hasrat akan hidup yang lebih baik dan dengan bertambahnya jumlah manusia di dunia ini. Dengan demikian, pertumbuhan konsumsi energi dunia di abad 21 ini tidak dapat dihindari.

Dalam rangka keadilan, energi yang merupakan kebutuhan hidup dasar seyogyanya harus dapat dinikmati oleh seluruh penduduk dunia. Untuk itu maka harga energi ini sedapat mungkin harus dapat terjangkau oleh seluruh warga dunia. Kesadaran akan terjadinya perubahan lingkungan mengakibatkan pasokan energi ini juga harus dapat tanpa merusak kelestarian lingkungan dan tanpa mempengaruhi iklim global, seraya di saat yang sama juga menjaga agar ketersediaan pasokan tersebut dapat berkelanjutan.

Berbagai upaya telah banyak dilakukan untuk mencari alternatif pengganti minyak bumi sebagai sumber energi. Salah satu sumber alternatif tersebut adalah nuklir. Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) telah mulai digunakan sejak tahun 1950an dan saat ini digunakan di 30 negara di dunia dengan jumlah 448 PLTN yang beroperasi di akhir tahun 2017 dan memiliki kapasitas pembangkitan listrik global sebesar 392 GW(e) [1]. Kapasitas ini meningkat sekitar 1,2 GW(e) dibanding tahun 2016.

Makalah ini secara singkat akan menguraikan perkembangan pemanfaatan PLTN di dunia dalam 25 tahun terakhir, proyeksi pengembangannya di tahun-tahun mendatang, dan prospek pembangunannya di Indonesia. Tujuan penulisan makalah adalah untuk memberikan gambaran mengenai perlunya kehadiran suatu PLTN di Indonesia untuk mendukung pertumbuhan investasi dan ekonomi masyarakat.

## TEORI

### Status terkini PLTN di Dunia

Sampai akhir Desember 2017, tercatat ada sebanyak 448 PLTN yang beroperasi di seluruh dunia, dengan kapasitas total 392 GW(e) [1]. Dari keseluruhan PLTN tersebut, 81,9% merupakan reaktor berpendingin dan moderator air ringan, 10,9% reaktor berpendingin dan moderator air berat, 3,3% merupakan reaktor berpendingin air dengan moderator grafit, 3,1% merupakan reaktor berpendingin gas, dan sisanya reaktor cepat berpendingin metal cair. Hampir 89% listrik yang dibangkitkan nuklir dihasilkan oleh 370 reaktor air ringan (LWR).

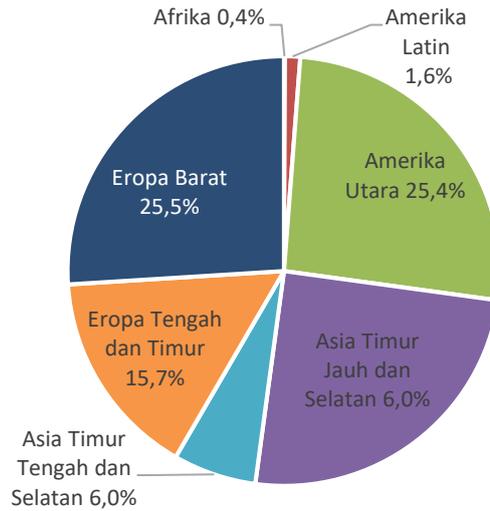
Dengan kapasitas total 391 GW(e) pada akhir tahun 2016, PLTN di seluruh dunia membangkitkan listrik sekitar 2476 TW.jam. Jumlah listrik yang dihasilkan ini setara dengan 11% dari produksi total listrik yang dibangkitkan pada tahun 2016 [2].

Gambar 1 memperlihatkan distribusi geografis dari 448 PLTN yang beroperasi di 30 negara hingga akhir Desember 2016 [1]. Seperti terlihat, sebagian besar PLTN tersebut berada di negara-negara industri.

Pada tahun 2017, 4 PLTN yang seluruhnya dari jenis PWR dikoneksikan ke jaringan, yaitu 4 PLTN di Cina dan 1 PLTN di Pakistan. Namun demikian, 5 PLTN ditutup secara permanen (Kori-1 di Republik Korea, Oskarhamm-1 di Swedia, Santa Maria de Garoña di Spanyol, Monju di Jepang dan Gundremmingen-B di Jerman).

Dari keseluruhan 448 PLTN yang operasional, 47% telah beroperasi selama 30 hingga 40 tahun, dan 14% lebih dari 40 tahun. Program operasi jangka panjang dan manajemen penuaan tengah diterapkan untuk meningkatkan jumlah PLTN yang dapat terus beroperasi. Di AS, misalnya, 86 dari 99 PLTN telah diperbaharui izin operasinya hingga 60 tahun, dan NRC juga pada Juli 2017 telah mengeluarkan pedoman untuk memperbaharui izin operasi PLTN hingga 80 tahun.

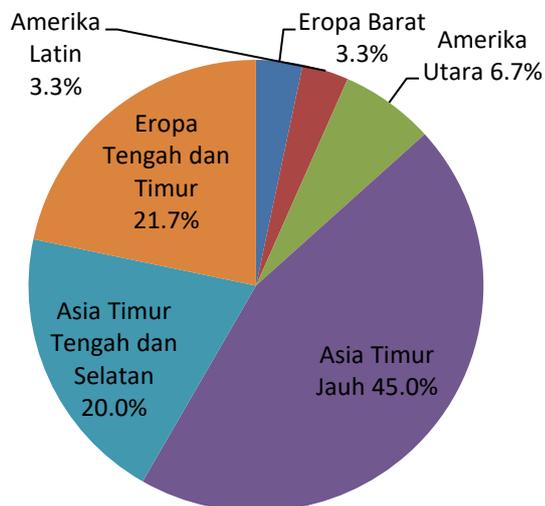
Jika beberapa negara industri mulai mempertimbangkan untuk menutup PLTN-nya, banyak negara di belahan dunia lain yang justru mulai membangunnya. Sampai 31 Desember 2017 sebanyak 57 PLTN tengah dibangun di berbagai belahan dunia. Gambar 2 memperlihatkan distribusi regional PLTN yang tengah dibangun sampai tahun 2017 [1].



Gambar 1. Status PLTN yang beroperasi hingga 2017 berdasar kawasan.

Seperti terlihat pada Gambar 2, sebagian besar PLTN yang tengah dibangun berada di kawasan Asia Timur Jauh, disusul oleh Eropa Tengah dan Timur, Asia Timur Tengah dan Selatan, Amerika Utara, Amerika Latin dan Eropa Barat.

Cina merupakan negara yang tengah membangun paling banyak (18 PLTN) saat ini, diikuti oleh Russia dan India (masing-masing 7), Unit Emirat Arab dan Republik Korea (masing-masing 4), Belarus, Jepang, Pakistan, Slowakia, Ukraina dan AS (masing-masing 2), dan 5 negara lain masing-masing satu.



Gambar 2. PLTN yang tengah dibangun.

Belarus merupakan negara Eropa Barat yang baru pertama kali membangun namun sekaligus dua unit dan direncanakan akan komisioning pada tahun 2019 dan 2020. Negara Eropa Barat lainnya yang tengah membangun PLTN masing-masing satu unit saat ini adalah Perancis dan Finlandia..

### Proyeksi PLTN di Dunia

Berdasar pernyataan yang disampaikan oleh negara-negara anggota pada saat penyelenggaraan Konferensi Umum IAEA ke 60 tahun 2016, dan pada berbagai forum publik sampai Juli 2017, posisi negara-negara pemilik PLTN terhadap masa depan PLTN di negara mereka diberikan pada Tabel 1 [3].

Tabel 1. Posisi negara yang mengoperasikan PLTN.

Kategori	Negara
Unit baru sedang dibangun	Argentina, Brazil, Cina, Finlandia, Perancis, India, Jepang, Republik Korea, Pakistan, Russia, Slovakia, Ukraina, AS
Unit baru sedang dibangun dengan rencana penambahan	Cina, Finlandia, India, Jepang, Republik Korea, Russia, Pakistan, AS
Tidak ada unit sedang dibangun namun diusulkan untuk membangun baru	Armenia, Kanada, Republik Ceko, Hongaria, Iran, Romania, Afrika Selatan, Inggris
Tegas tidak akan membangun unit baru	Belgia, Spanyol, Swiss
Tegas akan menutup unit yang ada	Jerman

Dari sebanyak 30 negara yang mengoperasikan PLTN saat ini, 13 negara masih tengah membangun unit baru dan 9 negara diantaranya bahkan memiliki rencana untuk membangun unit baru.

Di Bangladesh, konstruksi terkait keselamatan untuk Unit 1 PLTN Rooppur akan dimulai pada 30 November, dengan dua unit PLTN Rooppur diharapkan dapat komisioning pada tahun 2023 dan 2024. Di Turki, Unit 1 PLTN Akkuyu diharapkan komisioning pada tahun 2023, sementara Mesir telah menyelesaikan negosiasi dengan Rosatom dari Federasi Rusia tentang empat persetujuan pokok untuk membangun empat unit PLTN di El Dabaa yang direncanakan untuk terwujud antara 2023 dan 2026. Rosatom juga tengah melakukan negosiasi dengan Jordania dan diharapkan pada tahun 2018 ini keputusan tentang investasi final telah dapat dicapai.

Berdasar pernyataan yang disampaikan pada Konferensi Umum IAEA tahun 2016 dan pada forum publik sampai Juli 2017, beberapa negara yang tidak atau belum memiliki PLTN memiliki posisi seperti yang diberikan pada Tabel 2 [3].

Tabel 2. Posisi negara yang tidak memiliki PLTN.

Status negara	Jumlah negara
Konstruksi PLTN pertama telah dimulai	2
PLTN pertama tengah dipesan	2
Keputusan dibuat, persiapan infrastruktur	5
Persiapan aktif tanpa keputusan final	7
Mempertimbangkan program PLTN	12
Menyatakan ketertarikan pada PLTN	20

### Landasan Legal Rencana Pembangunan PLTN di Indonesia

Rencana pembangunan PLTN yang pertama di Indonesia telah lama digaungkan, bahkan sejak pertengahan tahun 1960an ketika pemerintah mulai membangun kompleks penelitian nuklir di Serpong dengan bantuan Uni Soviet saat itu. Wacana rencana ini lenyap seiring dengan jatuhnya pemerintahan Presiden Soekarno menyusul pemberontakan PKI yang gagal total.

Pada tahun 1991-1996 kegiatan studi kelayakan pembangunan PLTN di Indonesia dari berbagai aspek dilakukan oleh BATAN bekerjasama dengan konsultan Newjtec Inc. [4]. Kegiatan ini berlangsung menyusul menurunnya produksi minyak Indonesia pada beberapa

tahun sebelumnya sehingga perlu dicari alternatif sumber energi yang lain untuk memenuhi kebutuhan listrik Indonesia. Hasil studi menunjukkan bahwa tapak Lemah Abang di Jepara merupakan calon tapak terbaik untuk pembangunan PLTN ini. Namun karena adanya krisis moneter pada tahun 1997, yang diikuti dengan krisis politik, rencana ini kembali gagal terwujud.

Harapan kembali muncul setelah permintaan atas listrik meningkat tajam pada pertengahan tahun 2000an, sementara cadangan sumber daya energi yang ada tidak dapat mencukupi kebutuhan listrik nasional hingga tahun 2025. Untuk mengantisipasi hal ini pemerintah menerbitkan Peraturan Presiden (Perpres) Nomor 5 Tahun 2006 tentang Kebijakan Energi Nasional [5].

Dalam Perpres Nomor 5 Tahun 2006 dinyatakan antara lain bahwa nuklir merupakan salah satu bentuk dari energi baru, yaitu energi yang dihasilkan oleh teknologi baru baik yang berasal dari energi terbarukan maupun energi tak terbarukan. Selain itu dinyatakan pula bahwa sasaran Kebijakan Energi Nasional antara lain adalah terwujudnya bauran energi optimal pada tahun 2025, dengan kontribusi energi baru dan energi terbarukan lainnya, khususnya biomassa, nuklir, tenaga air, tenaga surya, dan tenaga angin menjadi lebih dari 5%.

Namun demikian, seiring dengan bergantinya pemerintahan, Perpres Nomor 5 Tahun 2006 dicabut dan dinyatakan tidak berlaku lagi, dan diganti dengan Peraturan Pemerintah Nomor 79 tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional [6].

Pada PP Nomor 79 Tahun 2014 dinyatakan antara lain bahwa pemanfaatan energi nuklir harus mempertimbangan keamanan pasokan energi nasional dalam skala besar, mengurangi emisi karbon dan tetap mendahulukan potensi energi baru dan energi terbarukan sesuai nilai keekonomiannya, serta mempertimbangkannya sebagai pilihan terakhir dengan memperhatikan faktor keselamatan secara ketat.

Sebagai pelaksanaan lebih lanjut UU Nomor 30 Tahun 2007 tentang Energi, pemerintah menerbitkan PP Nomor 22 Tahun 2017 tentang Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) [7]. Pada RUEN ini nuklir dibahas pada satu kebijakan utama dan dua kebijakan pendukung.

Pada kebijakan utama prioritas pengembangan energi, nuklir ditetapkan pada strategi 6 yang berbunyi bahwa 'pengembangan energi nuklir yang dimanfaatkan dengan mempertimbangan keamanan pasokan energi nasional dalam skala besar, mengurangi emisi karbon dan tetap mendahulukan potensi energi baru dan energi terbarukan sesuai nilai keekonomiannya, serta mempertimbangkannya sebagai pilihan terakhir dengan memperhatikan faktor keselamatan secara ketat'.

Untuk melaksanakan hal ini dilakukan beberapa kegiatan sebagai berikut:

1. meneliti pengembangan teknologi PLTN disertai aspek-aspek keekonomian dan keselamatan;
2. mendorong penguasaan teknologi PLTN sejalan dengan perkembangan terkini kemajuan teknologi PLTN di dunia;
3. membangun kerjasama internasional terkait studi pengembangan PLTN;
4. melakukan analisis multi kriteria terhadap implementasi PLTN mencakup kepentingan mendesak, skala besar, jaminan pasokan, keseimbangan pasokan energi, pengurangan emisi karbon, faktor keselamatan, dan skala keekonomian dengan melibatkan berbagai pandangan dari berbagai *stakeholder*;
5. menyusun peta jalan (*roadmap*) implementasi PLTN sebagai pilihan terakhir dalam prioritas pengembangan energi nasional.

Pada kebijakan pendukung lingkungan hidup dan keselamatan, nuklir ditetapkan pada strategi 4 yang berbunyi 'setiap perusahaan instalasi nuklir wajib memperhatikan keselamatan dan risiko kecelakaan serta menanggung seluruh ganti rugi kepada pihak ketiga yang mengalami kerugian akibat kecelakaan nuklir.

Untuk melaksanakan strategi ini ditetapkan program penguatan kapasitas nasional di bidang keselamatan penggunaan tenaga nuklir, dengan beberapa kegiatan berikut:

1. Menerapkan standar internasional keselamatan PLTN
2. Menyusun pra studi kelayakan (kajian akademik) untuk memutuskan perencanaan pembangunan PLTN
3. Melaksanakan secara konsisten Perpres Nomor 74 Tahun 2012 tentang Pertanggungjawaban Kerugian Nuklir.

Kebijakan pendukung kedua yang terkait nuklir adalah penelitian, pengembangan dan perapan teknologi energi. Dengan strategi 'pemerintah pusat dan/atau daerah melakukan

penguatan bidang penelitian, pengembangan dan penerapan energi', kegiatan yang dilakukan adalah peningkatan penelitian dan pengembangan serta penguasaan dan penerapan teknologi energi, dan menyiapkan penguasaan teknologi PLTN.

## METODOLOGI

Pembahasan pada makalah ini dilakukan dengan metode deskriptif melalui studi literatur. Literatur yang diacu meliputi baik dokumen resmi organisasi internasional, ketentuan perundang-undangan nasional, makalah ilmiah, mau pun komentar atau berita yang dimuat dalam media nasional terpercaya.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Proyeksi Pengembangan PLTN di Dunia

Setiap tahun IAEA menerbitkan proyeksi kapasitas pembangkitan dari PLTN yang dibagi atas dua proyeksi, yaitu proyeksi rendah dan proyeksi tinggi [2]. Proyeksi rendah mengasumsikan bahwa keadaan saat ini akan terus berlanjut dengan beberapa perubahan dalam kebijakan yang akan mempengaruhi penggunaan PLTN. Proyeksi tinggi, sementara itu, mengasumsikan bahwa laju pertumbuhan ekonomi dan permintaan listrik akan berlanjut, terutama pertumbuhan di negara-negara Timur Jauh. PLTN juga diperkirakan akan diterima di banyak negara sebagai pilihan untuk mitigasi perubahan iklim yang hemat biaya [8].

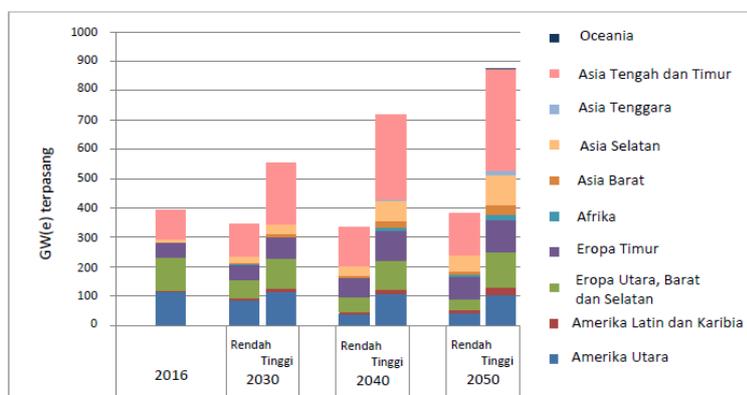
Dengan proyeksi rendah, IAEA memperkirakan kapasitas nuklir menurun dari 392 GWe pada akhir 2016 menjadi 345 GWe pada tahun 2030, penurunan lebih lanjut menjadi 332 GWe pada 2040, sebelum pulih ke tingkat saat ini pada tahun 2050.

Sekitar 320 GWe kapasitas tenaga nuklir baru akan terpasang pada 2050 untuk menggantikan hilangnya kapasitas akibat penghentian operasi beberapa reaktor, meskipun penggantian tersebut tidak berada di kawasan yang sama. Selain itu, pangsa nuklir dari pembangkit listrik global juga menurun dari tingkat saat ini sekitar 11% menjadi 6% pada tahun 2050.

Pada proyeksi tinggi, kapasitas pembangkit nuklir global diperkirakan meningkat menjadi 554 GWe pada tahun 2030, 717 GWe pada tahun 2040 dan 874 GWe pada tahun 2050. Pangsa nuklir dari pembangkit listrik global akan meningkat dari tingkat saat ini sekitar 11% menjadi 13,7% pada tahun 2050. Pertumbuhan terbesar diharapkan di Asia Tengah dan Timur, di mana kapasitas meningkat sekitar 3,5 kali pada tahun 2050.

Dibandingkan dengan proyeksi 2016 yang memperhitungkan pangsa nuklir hingga 2030 [9], proyeksi 2017 memperhitungkan bahwa pangsa nuklir akan berkurang 45 GW(e) hingga 2030 baik pada proyeksi rendah maupun tinggi. Pengurangan ini disebabkan antara lain karena adanya PLTN yang akan berhenti beroperasi, berkurangnya daya saing PLTN terhadap pembangkit listrik yang lain, dan berubahnya kebijakan nuklir nasional suatu negara menyusul terjadinya kecelakaan di PLTN Fukushima pada tahun 2011 yang lalu.

IAEA juga telah memproyeksikan pangsa PLTN berdasar kawasan. Gambar 3 memperlihatkan pangsa PLTN tersebut hingga tahun 2050, untuk proyeksi rendah maupun tinggi [3].



Gambar 3. Proyeksi pangsa PLTN berdasar kawasan.

Seperti terlihat pada Gambar 3, proyeksi pangsa PLTN diberikan atas proyeksi rendah dan tinggi. Secara konsisten, pangsa PLTN di kawasan Asia Tengah dan Timur

diproyeksikan akan terus meningkat baik untuk proyeksi rendah maupun tinggi. Hal ini berbeda dengan pangsa di Eropa Utara, Barat dan Selatan yang terus menurun, sementara di Amerika Utara akan sedikit meningkat pada tahun 2030, namun akan turun kembali pada tahun 2040 dan 2050.

Untuk kawasan Asia Tenggara, diperkirakan tidak ada pangsa PLTN hingga 2030, namun dengan proyeksi rendah diperkirakan PLTN mulai berperan pada tahun 2040 dengan kapasitas 1 GW(e), sementara proyeksi tinggi memperkirakan PLTN akan operasional dengan kapasitas 9 GW(e). Pada tahun 2050, pangsa PLTN diperkirakan meningkat menjadi 3 GW(e) pada proyeksi rendah dan 14 GW(e) pada proyeksi tinggi.

Selain IAEA, beberapa organisasi internasional juga telah menerbitkan proyeksi pembangkitan kapasitas PLTN menurut perhitungan mereka masing-masing. Dalam visinya yang disebut sebagai 'Harmony', World Nuclear Association (WNA) sebagai organisasi internasional yang beranggotakan para pelaku industri nuklir global memiliki tujuan agar 25% listrik dunia dipasok oleh PLTN dengan kapasitas 1000 GW pada tahun 2050 [10].

Tujuan 'Harmony' dikembangkan dengan dasar keinginan yang kuat untuk menghindari konsekuensi perubahan iklim yang sangat merusak dengan cara memaksimalkan semua sumber energi yang rendah karbon, dengan nuklir sebagai salah satu sumber energi yang penting.

Pentingnya PLTN dalam memenuhi kebutuhan energi seraya meminimalkan karbon dioksida dan pencemar udara lainnya juga dinyatakan pada edisi tahunan OECD IEA World Energy Outlook tahun 2017. Dengan skenario penambahan suhu global maksimal 2°C sampai akhir abad 21 (*2D scenario*), OECD IEA memprediksi pangsa PLTN akan menjadi sekitar 18% pada tahun 2050 [11]. Hal ini berarti akan ada penambahan kapasitas terpasang global dari tingkat 396 GW saat ini menjadi 930 GW pada tahun 2050.

Beberapa proyeksi lain terkait dengan pangsa PLTN pada pembangkitan listrik global yang dibuat oleh organisasi internasional lain dapat disebutkan sebagai berikut [12]:

- a. *International Energy Outlook (IEO)-2017* yang diterbitkan oleh *US Energy Information Administration* memprediksi peningkatan pangsa dunia dari PLTN sebesar 1,6% setiap tahun hingga 2040
- b. *The Asia/World Energy Outlook 2016* dari *Institute of Energy Economics* di Jepang (IEEJ) memperkirakan kapasitas pembangkitan listrik dari PLTN secara global akan meningkat dari 399 GW(e) pada tahun 2014 menjadi 612 GW(e) pada tahun 2040. Peningkatan pangsa PLTN ini akan membantu negara-negara di Asia untuk mencapai pertumbuhan ekonomi, keamanan energi dan proteksi lingkungan di masa mendatang
- c. World Energy Council (WEC) pada tahun 2016 menerbitkan skenario bahwa permintaan listrik global akan meningkat dua kali lipat pada tahun 2060. Dengan dunia mencari sumber energi yang rendah karbon, pangsa PLTN akan menjadi 17%, atau sekitar 7817 TWh pada tahun 2060.
- d. Energy Outlook 2017 yang diterbitkan BP meramalkan bahwa kebutuhan listrik tahun 2035 meningkat menjadi 47% dibanding tingkat 42% pada tahun 2015, dengan PLTN tumbuh sekitar 2,3% per tahun.

Beberapa proyeksi dan skenario yang dibuat oleh berbagai organisasi internasional di atas menunjukkan bahwa PLTN diperkirakan akan terus berkembang dan memainkan peran penting, terutama dengan adanya kebutuhan proteksi lingkungan dari pencemaran udara akibat pengoperasian pembangkit listrik.

### **Prospek Pembangunan PLTN di Indonesia**

Meskipun rencana pemanfaatan nuklir untuk pembangkitan listrik di Indonesia telah dimulai sejak tahun 1960an, sampai saat ini rencana tersebut belum terlaksana. Indonesia dan Thailand merupakan dua negara yang dipandang telah memiliki rencana yang matang untuk pembangunan PLTN pertamanya, namun komitmen yang kuat untuk membangunnya belum ada [11].

Munculnya isu ketahanan energi pada pertengahan tahun 2000an dan komitmen Presiden Susilo Bambang Yudhoyono (SBY) saat itu untuk berperan dalam pengurangan pemanasan global mendorong pemerintah untuk melihat nuklir sebagai salah satu sumber energi yang dapat mengurangi perubahan iklim.

Pada masa-masa inilah terbit Peraturan Presiden Nomor 5 Tahun 2006 yang cukup berpihak kepada PLTN. Kunjungan Dirjen IAEA Dr. M. ElBaradei pada Desember 2006 juga ikut mendukung dalam pengambilan kebijakan yang mengarah pada persiapan yang lebih konkret untuk membangun PLTN yang pertama di Indonesia.

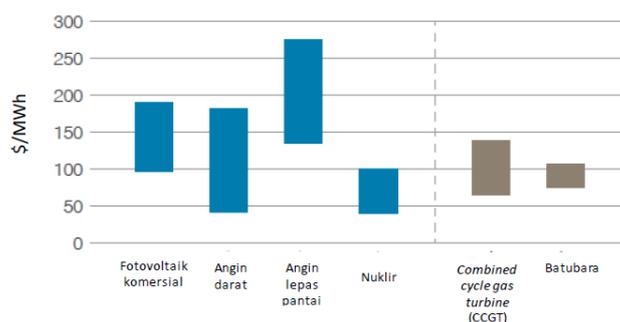
Namun demikian, para aktivis anti nuklir tidak tinggal diam melihat perkembangan ini. Gerakan penolakan yang sebelumnya berjalan dengan diam kini digelorakan di semua kesempatan yang ada. Penolakan ini tidak hanya semata karena kekhawatiran terhadap kecelakaan, namun juga lebih disebabkan oleh ketidakpercayaan masyarakat terhadap kemampuan pemerintah menerapkan kebijakan yang lebih bersifat patrimonial dibanding kelembagaan [13].

Tingginya resistensi masyarakat menyebabkan pemerintah berpikir ulang dan akhirnya menunda rencana pembangunan PLTN tersebut. Penyebab lain yang barangkali lebih kuat adalah alasan politis, karena Presiden SBY yang akan menghadapi pemilihan periode keduanya tidak ingin kehilangan suara dari para pendukungnya. Pada akhir masa pemerintahannya, Presiden SBY mencabut Perpres Nomor 5 Tahun 2006 dan menggantinya dengan PP Nomor 79 Tahun 2014 yang kembali menempatkan nuklir sebagai pilihan terakhir sebagai sumber energi.

Kebijakan 'memmingirkan' PLTN sebagai salah satu sumber energi yang potensial tampak jelas pada dokumen 'Outlook Energi Indonesia 2016' yang diterbitkan oleh Dewan Energi Nasional (DEN) [14]. Dokumen ini sama sekali tidak menyebut kata 'nuklir' dalam batang tubuhnya. Ketidakberpihakan DEN pada PLTN juga dinyatakan secara gamblang oleh salah seorang anggotanya yang menyatakan bahwa rencana pembangunan PLTN di Indonesia harus dihentikan [15].

Namun demikian, pemerintah dari sisi lain tampaknya tidak ingin terlihat sama sekali tidak mengindahkan nuklir sebagai sumber energi. Untuk itu maka pada PP Nomor 22 Tahun 2017 tentang Rencana Umum Energi Nasional klausul tentang nuklir dimasukkan kembali sebagai salah satu kebijakan utama prioritas pengembangan energi. Dalam redaksionalnya, kata kunci yang digunakan hampir sama persis dengan susunan kata pada PP Nomor 79 Tahun 2014.

Tingginya resistensi masyarakat terhadap nuklir sebagai bahan bakar energi diakui secara langsung oleh Wakil Menteri ESDM [16]. Namun, alasan lain Wakil Menteri ESDM bahwa harga jual listrik dari PLTN (US\$9,7-13,6 sen per kWh) di atas harga Biaya Pokok Produksi (BPP) nasional (US\$7,39 sen per kWh) dapat diperdebatkan karena tampaknya harga jual listrik PLTN masih kompetitif dibandingkan dengan harga jual listrik dari sumber energi lain yang digunakan di Indonesia yang tingkat pencemaran lingkungannya relatif tinggi. Jika harga jual listrik PLTN dibandingkan dengan harga jual listrik dari sumber dengan karbon rendah lainnya, maka harga jual listrik PLTN masih salah satu yang terbaik. Gambar 4 memperlihatkan perbandingan *levelized cost of electricity* (LCOE) pada tingkat diskon 7% dari nuklir dibanding sumber lain yang emisi karbonnya cukup rendah [10]. LCOE merupakan konsep yang digunakan untuk membandingkan biaya energi yang berasal dari berbagai sumber energi, dan merupakan perbandingan antara biaya total selama masa pakai (dalam USD) dengan produksi energi selama masa pakai tersebut (kW.h). Biaya total selama masa pakai merupakan penjumlahan biaya modal dengan biaya pemeliharaan selama masa pakai [17].



Gambar 4. Perbandingan *levelized cost of electricity* (LCOE) pada tingkat diskon 7% sumber nuklir dibanding sumber lain dengan emisi karbon rendah.

Dengan demikian, ketidakpercayaan diri pemerintah yang utama untuk merealisasikan program pembangunan PLTN pertama di Indonesia adalah politik massa dalam bentuk tingginya resistensi yang ada. Kenyataannya, resistensi tidak hanya berasal dari organisasi non-pemerintah seperti WALHI (Wahana Lingkungan Hidup Indonesia) dan Greenpeace

Indonesia, namun juga dari masyarakat lokal yang berhimpun dalam Masyarakat Reksa Bumi (MAREM) dan beberapa politisi yang ada di DPR [18].

Dengan kuatnya politik massa yang anti, apakah mungkin pembangunan PLTN di Indonesia dapat terwujud? Pertanyaan ini sangat sulit untuk dijawab, namun yang jelas pimpinan dan staf BATAN dari satu generasi ke generasi berikutnya secara konsisten mampu memelihara api hasrat untuk melihat berdirinya PLTN di Indonesia. Selain itu, diyakini masih ada ilmuwan, pemimpin daerah dan juga politisi yang secara diam-diam mendukungnya.

Salah satu alternatif yang coba dilakukan oleh BATAN adalah dengan mencari tapak prospektif lain disamping tapak Lemah Abang di Semenanjung Muria. Beberapa calon tapak di luar tapak Lemah Abang yang telah dilakukan studi kelayakannya adalah di Banten (pulau Panjang dan Bojonegara) dan di Bangka Belitung (Tanjung Berdaun dan Tanjung Berani) [4]. Pemerintah daerah provinsi Kalimantan Timur bahkan telah meminta izin kepada pemerintah pusat untuk membangun PLTN dengan menggandeng investor asing [19].

Pandangan lain adalah perlunya konsistensi pemerintah dalam menyatukan dukungan politik dari berbagai kalangan begitu kebijakan pembangunan PLTN ditetapkan, dan juga konsistensi dalam menerapkan kebijakan tersebut [13]. Namun demikian pertanyaan mendasar belum terjawab, yaitu apakah pemerintah berani menetapkan kebijakan yang mendukung pembangunan PLTN pertama di Indonesia di tengah kuatnya penolakan secara sosial dan politik.

Untuk ini barangkali butuh suatu terobosan yang sangat kuat agar pemerintah dapat menetapkan kebijakan yang pro nuklir, dan yakin bahwa PLTN sangat diperlukan untuk penganeekaragaman sumber daya energi. Dasar penetapan bisa berupa mandat kepercayaan hampir 100% dari masyarakat saat pemilu sehingga memiliki keberanian untuk menetapkan kebijakan tersebut, kebutuhan energi yang sangat besar dan melonjak, terganggunya pasokan sumber daya yang digunakan saat ini dalam jangka waktu yang cukup lama, atau barangkali oleh sebab lain yang bisa muncul secara tiba-tiba.

## KESIMPULAN

Dari pembahasan di atas dapat disimpulkan bahwa PLTN masih cukup banyak di dunia, dan proyeksi pemanfaatannya di tahun-tahun mendatang masih cukup terbuka. Untuk kasus Indonesia, PLTN dapat mungkin terbangun jika pemerintah memiliki terobosan dan keyakinan yang kuat akan perlunya kontribusi PLTN dalam penganeekaragaman sumber daya energi yang digunakan.

## DAFTAR PUSTAKA

1. IAEA, GC(61)/INF/2, "Nuclear Technology Review 2018", August (2018).
2. IAEA, Reference Data Series No.1, 2017 Edition, "Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050", IAEA, Vienna (2017).
3. IAEA, GOV/INF/2017/12-GC(61)/INF/8, "International Status and Prospects for Nuclear Power 2017, Report by the Director General", 28 July 2017.
4. BATAN, Rencana Pembangunan PLTN di Indonesia, <http://www.batan.go.id/index.php/id/infonuklir/nuklir-indonesia-infonuklir/program-pltn/1810-rencana-pembangunan-pltn-di-indonesia>. Diakses tanggal 3 Mei 2018
5. Peraturan Presiden, "Kebijakan Energi Nasional", Perpres No. 5 Tahun 2006, Presiden RI (2006).
6. Peraturan Pemerintah, "Kebijakan Energi Nasional", PP No. 79 Tahun 2014, Pemerintah RI (2014).
7. Peraturan Presiden, "Rencana Umum Energi Nasional", Perpres No. 22 Tahun 2017, Presiden RI (2017).
8. IAEA, "Climate Change and Nuclear Power 2016", IAEA, Vienna (2016).
9. IAEA, Reference Data Series No.1, 2016 Edition, "Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050", IAEA, Vienna (2016).
10. World Nuclear Association, "Harmony, the global nuclear industry's vision for the future of electricity", 2017, [http://world-nuclear.org/getmedia/602d07d5-b28d-4ebd-93e5-cd337e0ce82a/Harmony\\_ed2\\_lowres.pdf.aspx](http://world-nuclear.org/getmedia/602d07d5-b28d-4ebd-93e5-cd337e0ce82a/Harmony_ed2_lowres.pdf.aspx). Diakses tanggal 8 Mei 2018
11. IEA/NEA, "Technology Roadmap Nuclear Energy, 2015 Edition", (2015).
12. World Energy Needs and Nuclear Power, <http://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/world-energy-needs-and-nuclear-power.aspx>. Diakses tanggal 7 Mei 2018

13. HARIYADI. "Agenda-Setting Pembangunan PLTN dan Pencapaian Ketahanan Listrik (Studi di Jepara dan Pangkal Pinang)". *Jurnal Ekonomi & Kebijakan Publik*, Vol.7 No.2, Hal. 27-142 (2016).
14. Sekretariat Jenderal Dewan Energi Nasional. "Outlook Energi Indonesia 2016". DEN, Jakarta (2016) ISSN 2527-3000.
15. <http://ekonomi.metrotvnews.com/read/2016/01/10/210120/den-rencana-pembangunan-pltn-di-indonesia-harus-dihentikan>. Diakses tanggal 4 Mei 2018
16. Mungkinkah PLTN dibangun di RI? <https://finance.detik.com/energi/d-3713069/mungkinkah-pltn-dibangun-di-ri>. Diakses tanggal 3 Mei 2018.
17. The levelized cost of electricity: Definition and example, <https://thegrid.rexel.com/en-us/knowledge/energy-efficiency/w/wiki/92/the-levelized-cost-of-electricity-definition-and-example>. Diakses tanggal 28 September 2018.
18. Sulfikar Amir, 2010. *The State and the Reactor: Nuclear Politics in Post-Suharto Indonesia*. *Indonesia* Volume 89, Hal.101-147 (2010).
19. Pembangkit Listrik Nuklir, Kaltim tunggu 'lampu hijau', <http://industri.bisnis.com/read/20170714/44/671605/pembangkit-listrik-nuklir-kaltim-tunggu-lampu-hijau>. Diakses tanggal 7 Mei 2018.

## **KAJIAN SISTEM KESELAMATAN REAKTOR TMSR (*THORIUM MOLTEN SALT REACTOR*)**

**Erlan Dewita, Tagor Malem Sembiring, Sunarko**

Pusat Kajian Sistem Energi Nuklir (PKSEN)-BATAN  
Jl. Kuningan Barat, Mampang Prapatan, Jakarta Selatan, 12710  
Phone/ Fax : (021) 5204243, E-mail : erland@batan.go.id

### **ABSTRAK**

**KAJIAN SISTEM KESELAMATAN REAKTOR TMSR (*THORIUM MOLTEN SALT REACTOR*).** Dalam rangka keamanan, dan kemandirian energi nuklir, perlu dipertimbangkan penggunaan thorium sebagai bahan bakar alternatif. Thorium merupakan bahan fertil yang bila menyerap neutron akan menjadi bahan fisil U-233 sehingga dapat digunakan sebagai bahan bakar PLTN. Reaktor MSR (*Molten Salt Reactor*) merupakan reaktor berbahan bakar dan berpendingin garam cair serta dipandang sebagai tipe reaktor yang cocok menggunakan bahan bakar thorium. Aspek penting yang perlu diperhatikan dalam pemilihan teknologi reaktor adalah aspek keselamatan. Tujuan studi adalah mendapatkan pemahaman terhadap sistem keselamatan reaktor TMSR. Metodologi yang digunakan adalah kajian data sekunder dari beberapa negara yang mengembangkan reaktor TMSR. Hasil studi menunjukkan bahwa sistem keselamatan reaktor TMSR, meliputi: sistem pembuangan panas sisa secara pasif untuk mendinginkan teras reaktor selama keadaan darurat dan sistem pasif dalam memindahkan garam bahan bakar ke tangki pembuangan pada temperatur tinggi dengan gravitasi, sehingga reaktor dapat dipadamkan. Simplifikasi sistem dan kondisi operasi sistem yang sederhana menjadi keunggulan utamanya. Disamping itu, keselamatan melekat dengan mengandalkan keselamatan pasif telah diterapkan dalam desainnya. Jumlah sistem keselamatan tidak serumit dan sebanyak di sistem LWR. Hal ini yang mengakibatkan reaktor MSR dapat beroperasi dengan biaya yang relatif murah. Akan tetapi yang menjadi kendala adalah karena reaktor MSR masih dalam fase reaktor riset, sehingga proses perijinannya masih memerlukan waktu. Hasil studi diharapkan dapat menjadi bekal ilmu bagi peneliti, apabila di masa mendatang reaktor TMSR diterapkan di Indonesia.

Kata Kunci: thorium, reaktor garam cair, keselamatan, sistem keselamatan pasif, PLTN

### **ABSTRACT**

**ASSESSMENT OF TMSR (*THORIUM MOLTEN SALT REACTOR*) SAFETY SYSTEM.** *In order to maintain the security, independence of nuclear energy, thorium is considered as an alternative nuclear fuel. Thorium is a fertile material which when absorbing neutrons will be a fissile material U-233 which in nuclear reactors can produce chain fission reactions so that it can be used as fuel for nuclear power plants. The MSR (Molten Salt Reactor) reactor is a liquid salt and coolant reactor and is considered a suitable type of reactor using thorium fuel. However, an important aspect that needs to be considered in the selection of reactor technology is the safety aspect. The objective of the study was to get an understanding of the TMSR reactor safety system. The methodology of this study is assessment on secondary data from several countries that developing TMSR reactors. The results of the study show that the safety system of the TMSR reactor includes: passive residual heat dissipation systems to cool the reactor core during emergencies and passive systems in transferring fuel salt to the disposal tank at high temperatures by gravity, so that the reactor can be extinguished. Simplification of the system and simple operating system conditions are the main advantages. Besides that, inherent safety by relying on passive safety has been applied in its design. The number of safety systems is not as complicated and as much as in the LWR system. This resulted in the MSR reactor operating at a relatively low cost. However, it becomes an obstacle, because the MSR reactor is still in the phase of the research reactor, so the license process is still takes time. The results of the study are expected to be a provision of knowledge for researchers, if in the future the TMSR reactor is applied in Indonesia.*

*Keywords: Thorium, Molten Salt Reactor, Safety, Passive Safety System, NPP*

## PENDAHULUAN

Kebutuhan energi termasuk energi listrik akan semakin meningkat seiring meningkatnya pertumbuhan penduduk, kualitas hidup manusia, dan industri. Rasio elektrifikasi di Indonesia menunjukkan adanya peningkatan dari tahun ke tahun walaupun di beberapa daerah masih rendah, sehingga masih sering terjadi pemadaman listrik. Data menunjukkan pemenuhan kebutuhan energi masih tergantung pada bahan bakar fosil, seperti: batubara dan minyak, sehingga jumlah sumberdayanya semakin menipis. Oleh karena itu, pemerintah melalui PP No. 79 Tahun 2014 terkait bauran energi mengamanatkan untuk meningkatkan porsi Energi Baru Terbarukan (EBT), termasuk energi nuklir, untuk mengurangi porsi energi fosil dalam bauran energi nasional sampai Tahun 2025.[1].

Berdasarkan pada UU No.79 Tahun 2014 dan UU No 17 Tahun 2007 tentang RPJMN mengamanatkan untuk mulai dimanfaatkannya energi nuklir pada RPJM ke 3 (2015-2019). Oleh karena itu, BATAN berupaya memenuhi amanat tersebut dengan mulai mengembangkan energi nuklir untuk berkontribusi dalam bauran energi di Indonesia. Sebagai gambaran, berdasarkan data yang diperoleh menunjukkan bahwa pada akhir tahun 2015, terdapat 437 reaktor daya nuklir komersial (PLTN) yang beroperasi di 31 negara di dunia dengan memproduksi listrik sebesar 377 GWe dan setiap tahun membutuhkan 56.600 ton uranium. Sedangkan, pada tahun 2015 produksi uranium dunia adalah 55.975 ton dan telah menyediakan sekitar 99% dari kebutuhan reaktor di dunia yaitu 61.980 ton, sedangkan kekurangannya dipasok dari sumber-sumber sekunder, seperti daur ulang bahan bakar bekas [2].

Walaupun cadangan uranium diperkirakan masih cukup, namun kecenderungan bertambahnya jumlah PLTN yang menggunakan bahan bakar uranium secara terus menerus menyebabkan jumlah cadangannya semakin menipis. Karena itu, untuk menjaga keamanan dan keberlanjutan (*sustainability*) energi nuklir, akhir-akhir ini perhatian dunia mulai mengarah pada penggunaan thorium sebagai bahan bakar nuklir alternatif.

Thorium merupakan bahan fertil yang apabila menyerap neutron akan menjadi bahan fisil U-233 yang dalam reaktor nuklir dapat menghasilkan reaksi berantai sehingga dapat digunakan sebagai bahan bakar PLTN. Kelimpahan thorium dunia cukup besar yaitu 3-4 kali lebih banyak dibanding uranium dan terdistribusi secara merata. Selain itu, thorium memiliki beberapa keunggulan, dimana thorium dalam senyawa thorium dioksida secara kimia lebih stabil dan tahan radiasi dibanding uranium dioksida. Sedangkan energi yang dibangkitkan dari hasil fisi 1 atom U-233 lebih besar yaitu 81,95 TJ/kg dibanding hasil fisi 1 atom U-235 yaitu 77 TJ/kg.[3].

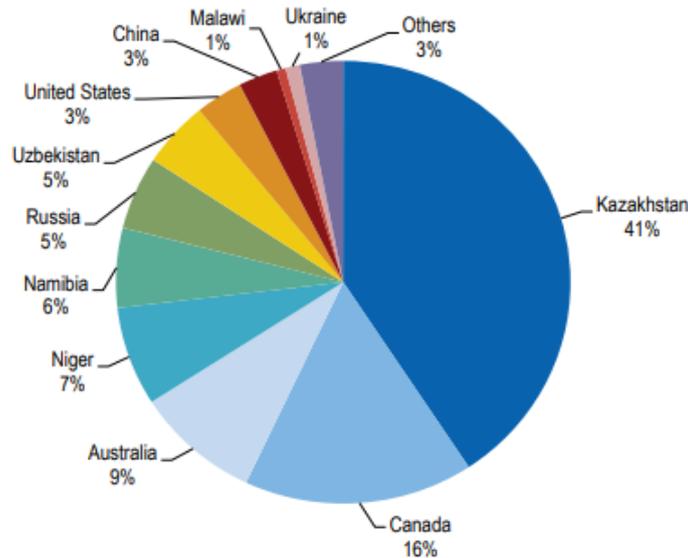
Salah satu teknologi reaktor yang didesain cocok menggunakan bahan bakar thorium adalah jenis reaktor bahan garam cair (MSR).[4] Pada awal operasi reaktor, bahan bakar thorium yang digunakan dicampur dengan bahan fisil U-235, U-233 ataupun Pu-239 sebagai *driver*, selanjutnya bahan bakar thorium yang dimasukkan ke teras untuk menjaga kontinuitas operasinya.

Namun demikian, dalam rangka mengimplementasikan teknologi reaktor MSR, hal penting yang perlu diperhatikan adalah sistem keselamatan. Dalam makalah ini akan dikaji sistem keselamatan reaktor TMSR yang dilakukan dengan metoda kajian terhadap beberapa data sekunder dengan tujuan untuk meningkatkan pemahaman terhadap sistem keselamatan reaktor TMSR yang selanjutnya dapat digunakan acuan apabila di masa mendatang reaktor MSR diterapkan di Indonesia.

## FAKTA DI SEKITAR BAHAN BAKAR DAN TEKNOLOGI REAKTOR THORIUM

### Kondisi Kebutuhan dan Pasokan Uranium Dunia

Produksi uranium yang dihasilkan beberapa negara di dunia menunjukkan adanya penurunan sebesar 4.1%, dari 58 411 tU in 2012 menjadi 55 975 tU pada 1 January 2015. Perubahan tersebut terutama disebabkan oleh penurunan produksi di Australia, dan hasil penambangan uranium yang lebih rendah dari Brasil, Republik Ceko, Malawi, Namibia, dan Niger. Negara-negara di dunia yang memproduksi Uranium pada tahun 2015, ditunjukkan dalam Gambar 1.

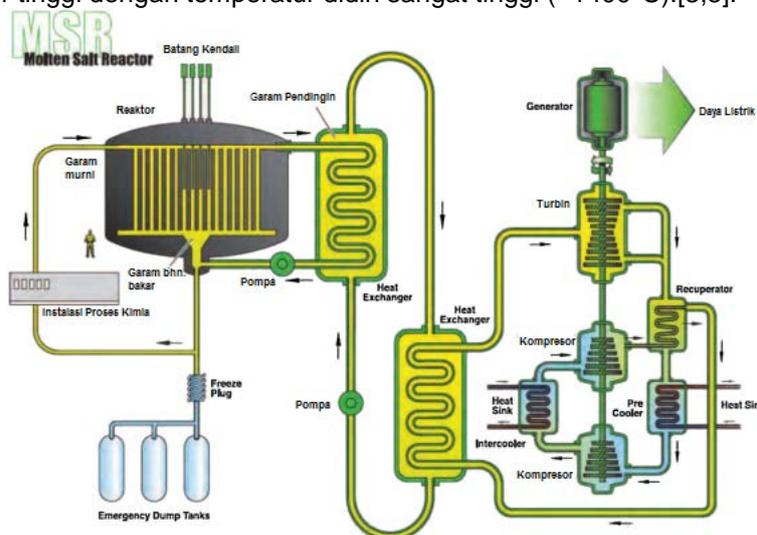


Gambar 1. Produksi Uranium pada tahun 2015 : 55 975 tU[2]

Sedangkan di negara-negara OECD, produksi menurun dari 17.956 tU pada tahun 2012 menjadi 16.185 tU pada tahun 2014, yang terutama diakibatkan dari penurunan produksi di Australia dan Republik Ceko, sementara kebutuhan uranium dunia menunjukkan adanya peningkatan yang disebabkan meningkatnya jumlah reaktor nuklir/ PLTN di dunia, seperti yang dilaporkan oleh WNA (*World Nuclear Association*) dimana per 1 Maret 2017 terdapat sejumlah 447 PLTN yang beroperasi di 31 negara yang merupakan peningkatan dari tahun 2016 dimana terdapat penambahan 8 unit PLTN. Reaktor tersebut menghasilkan listrik sebesar 391,9 gigawatt dan terdapat 59 reaktor nuklir yang sedang dalam konstruksi di 14 negara. Kondisi ini, akan berdampak pada meningkatnya kebutuhan uranium di dunia. Oleh karena itu penggunaan bahan bakar MOX dan thorium perlu ditingkatkan jikalau pada suatu saat terjadi keterbatasan pasokan uranium.[2]

### **Molten Salt Reactor (MSR)**

*Molten Salt Reactor (MSR)* dengan skema seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2[5], merupakan salah satu dari 6 jenis desain reaktor yang oleh GIF dimasukkan dalam kategori reaktor maju (*Advanced Reactor*) atau reaktor generasi 4. Karakteristik yang paling menonjol dari reaktor MSR adalah menggunakan bahan bakar garam cair yang berfungsi baik sebagai bahan bakar maupun pendingin reaktor. Reaktor MSR dapat digunakan untuk pembakaran aktinida, produksi listrik dan gas hidrogen, serta memproduksi bahan fisil (pembangkit). Bahan fisil, fertil, dan produk fisi terlarut dalam garam fluorida cair yang bertemperatur tinggi dengan temperatur didih sangat tinggi (~1400°C).[3,5].



Gambar 2. Skema Reaktor MSR[5]

Pada umumnya, jenis garam yang digunakan adalah garam fluoride. Reaktor jenis MSR cocok menggunakan thorium sebagai bahan bakar fertil. Pada saat reaktor beroperasi, thorium dan nuklida turunannya termasuk thallium-208 terkandung dalam bahan bakar tersebut. Bahan bakar bentuk cair dapat memudahkan dalam penanganannya terkait proteksi sinar gamma. MSR tidak menggunakan batang bahan bakar seperti reaktor jenis LWR, sehingga tidak memerlukan kelongsong bahan bakar.[6]. Energi hasil fisi dipindahkan secara langsung oleh bahan bakar garam cair itu sendiri dan tidak ada air di dalam sirkuit primer. Tekanan di bagian dalam reaktor MSR adalah sekitar 0.5 MPa, sehingga tidak memerlukan penggunaan bejana bertekanan seperti pada reaktor air tekan (PWR) yang memiliki tekanan bagian dalam tinggi reaktor sekitar 16 MPa. Bahkan dalam reaktor air dididih (BWR), tekanan operasinya adalah 7 MPa.[7]. Nilai tinggi ini disebabkan oleh tekanan uap air yang digunakan sebagai pendingin. Thorium setelah menyerap neutron akan terkonversi menjadi U-233. Reaktor MSR memerlukan material fisil (U-235, Pu-239 atau U-233) sebagai *driver* (penginisiasi untuk terjadinya proses fisi). Panas dihasilkan dalam teras reaktor dan dipindahkan oleh garam bahan bakar melalui penukar panas (*heat exchanger*) sebelum dimasukkan kembali ke dalam teras reaktor.

### Karakteristik Dasar dari Keselamatan Reaktor MSR

Kinerja keselamatan yang paling penting dari Reaktor MSR berasal dari faktor-faktor sebagai berikut[8]:

- (1) Sistem primer dan sekunder bertekanan lebih rendah dari 5 bar, dan tidak memiliki potensi bahaya kecelakaan akibat tekanan yang terlalu tinggi seperti kerusakan sistem atau kebocoran garam.
- (2) Garam pendingin dan bahan bakar secara kimia bersifat tidak terbakar atau meledak bila bereaksi dengan air atau udara (seperti yang terjadi pada kecelakaan Fukushima).
- (3) Titik dididih garam bahan bakar adalah sekitar 1670° atau lebih, jauh lebih tinggi dari pada temperatur operasi 973°K. Karena itu, tekanan sistem primer tidak dapat meningkat.
- (4) Garam bahan bakar tidak akan dapat menjadi kritis bila berdekatan dengan moderator grafit. Karena itu, garam bahan bakar yang bocor tidak akan menyebabkan kecelakaan kekritisasi.
- (5) MSR tidak memiliki garam bahan bakar dengan koefisien temperatur sangat negatif. Koefisien temperature grafit agak sedikit positif, tetapi dapat dikontrol karena peningkatan temperatur yang lambat tergantung kapasitas panasnya yang tinggi.
- (6) The delayed-neutron fraction dalam proses fisi U-233 lebih kecil dari pada dalam proses fisi U-235, dan seperuh dari neutron yang diperlambat yang dihasilkan diluar teras. Namun demikian, itu dapat dikontrol karena umur neutron yang lebih panjang, dan koefisien temperatur prompt negatif dari garam bahan bakar.
- (7) Komposisi bahan bakar dapat dibuat kapan saja bila diperlukan, sehingga reaktivitas berlebih dan reaktivitas batang kendali yang diperlukan cukup kecil dan pergeseran reaktivitas oleh batang juga cukup kecil.
- (8) Produk fisi berbentuk gas seperti Kr, Xe dan T dipindahkan dari garam bahan bakar secara kontinyu, mengurangi bahaya kebocoran produk fisi tersebut pada saat kecelakaan dan dalam pemrosesan kimia.

### PEMBAHASAN

Dalam rangka untuk menjaga keamanan dan kemandirian energi nuklir, perhatian dunia banyak tertuju pada implementasi thorium sebagai bahan bakar alternatif untuk reaktor nuklir/ PLTN. Teknologi yang sesuai/ cocok memanfaatkan bahan bakar thorium adalah jenis MSR. Teknologi reaktor yang diadopsi oleh suatu negara, pada umumnya melewati kajian terhadap aspek keselamatan teknologi tersebut. Karena itu, pada studi ini di fokuskan pada kajian terhadap aspek keselamatan dari reaktor MSR berbasis bahan bakar thorium. Selanjutnya di masa depan, bila Indonesia akan mengimplementasikan reaktor MSR berbasis thorium, maka pemahaman terkait teknologi tersebut sudah dikuasai. Pada dasarnya, keselamatan melekat merupakan salah satu persyaratan reaktor Generasi-IV agar reaktor dapat beroperasi tanpa perlu intervensi tindakan dari luar. Ciri keselamatan melekat yang dimiliki MSR adalah memiliki koefisien reaktivitas umpan balik yang besar, beroperasi pada tekanan yang rendah serta bahan bakar sudah berbentuk cair. Kontribusi dari efek Doppler dan ekspansi termal bahan bakar yang mengakibatkan sebagian bahan bakar keluar dari teras, sehingga nilai koefisien umpan balik negatif yang besar.[8] Ledakan dari uap dan hidrogen tidak mungkin terjadi karena beroperasi pada tekanan rendah dan tidak

menggunakan air. Demikian juga bahan bakar telah dalam bentuk cair sehingga kondisi pelelehan bahan bakar tidak dikenal karena telah dalam bentuk cair. Beberapa acuan menunjukkan bahwa ada 7 hal yang unggul dalam teknologi reaktor MSR yaitu:[7]

- (1) Sistem primer dan sekunder bertekanan lebih rendah dari 5 bar sehingga tidak memiliki potensi bahaya kecelakaan akibat tekanan yang terlalu tinggi.
- (2) Garam sebagai pendingin dan bahan bakar secara kimia bersifat tidak terbakar atau meledak bila bereaksi dengan air atau udara (seperti yang terjadi pada kecelakaan Fukushima).
- (3) Titik didih garam bahan bakar adalah sekitar 1670 K atau lebih, jauh lebih tinggi dari pada temperatur operasi 973 K. Karena itu, tekanan sistem primer tidak dapat meningkat. Reaktor MSR dapat menghasilkan temperatur yang tinggi.
- (4) Bahan bakar garam tidak akan dapat menjadi kritis bila berdekatan dengan moderator grafit. Karena itu, meskipun terjadi kebocoran tidak akan menyebabkan kecelakaan kekritisasi.
- (5) Reaktor MSR memiliki umur hidup neutron yang lebih besar dan koefisien temperatur negatif yang besar sehingga dapat mengendalikan reaktor lebih stabil meskipun fraksi neutron kasipnya lebih kecil dibanding reaktor berbahan bakar U-235.
- (6) Karena dioperasikan secara on-line refueling, maka reaktivitas lebih teras sangat kecil dan hanya memerlukan sedikit jumlah batang kendali.
- (7) Beberapa produk hasil belah harus ditangani untuk mengurangi efek radiasi yang tinggi, sehingga jika terjadi kecelakaan yang mengakibatkan adanya lepasan maka jumlahnya relatif lebih kecil.

Beberapa kelemahan yang ada dalam reaktor MSR adalah:[8]

- (1) Reaktor MSR belum pernah beroperasi secara komersial, baru dalam tahap eksperimen. Sehingga kesiapan teknologinya untuk masuk masih perlu uji coba untuk skala lebih besar dan waktu lama. Beberapa negara seperti Tiongkok dan Perancis sangat serius untuk mewujudkan MSR skala demonstrasi.
- (2) Reaktor masih memerlukan bahan bakar seperti U-235 atau Pu-239 sebagai bahan bakar awal agar terjadi kecukupan reaksi pembelahan. Ketergantungan terhadap uranium dapat dikurangi dengan menggunakan U-233 yang diperoleh dari reaksi thorium dengan neutron. Akan tetapi untuk mendapatkan U-233 yang besar membutuhkan reaktor pembiak cepat (*fast breeder reactor*) atau reaktor CANDU yang beroperasi dengan pergantian bahan bakarnya yang *on-operation*. Hal ini telah diterapkan oleh India dengan menggunakan U-233 sebagai bahan bakar di beberapa reaktor PLTNnya.
- (3) Bahan bakar garam cair memiliki korosifitas yang tinggi. Oleh karena itu, umur bejana reaktor tidak se lama reaktor PLTN tipe air ringan atau berat. Pergantian secara berkala terhadap bejana reaktor harus dilakukan.
- (4) Penggunaan grafit di reaktor MSR memiliki beberapa kelemahan yaitu umurnya yang terbatas dan yang kedua koefisien reaktivitas umpan baliknya bernilai agak positif. Hal ini tentu harus diperhatikan terutama saat operasi reaktor di daerah yang memberikan nilai positif tersebut.
- (5) Memerlukan beberapa perangkat proses kimia tambahan, yaitu untuk mengelola bahan bakar di teras dan memindahkan beberapa hasil belah yang dapat mengakibatkan paparan gamma yang tinggi. Keandalan perangkat ini harus menjadi bagian dalam perhitungan keandalan sistem.

Selain sistem keselamatan melekat, konsep pertahanan berlapis merupakan salah satu sistem keselamatan penting dalam desain reaktor, termasuk reaktor MSR.[9]. Dalam regulasi Perka BAPETEN No.1 Tahun 2011 dan Perka BAPETEN No.3 Tahun 2011 menyebutkan bahwa konsep ini harus diterapkan dalam desain suatu reaktor daya dan non daya. Konsep pertahanan berlapis sebagai falsafah keselamatan dilakukan dengan menggunakan strategi yang efektif dalam mengkompensasi kegagalan peralatan dan kesalahan manusia. Dalam reaktor daya tipe air (LWR, *light water reactor*), seperti PWR, konsep pertahanan berlapis diterapkan untuk mencegah terjadinya pelelehan bahan bakar. Akan tetapi karena bahan bakar di MSR sudah dalam bentuk cairan, maka konsep pertahanan berlapis di reaktor tipe air tidak dapat diterapkan untuk reaktor MSR.[10].

Dalam reaktor LWR, pencegahan terjadinya pelepasan radioaktif ke lingkungan, menggunakan prinsip pertahanan berlapis, mulai dari pelet (*Level 1*), kelongsong (*Level 2*), bejana tekan dan pipa (*Level 3*), penyungkup (*containment, Level 4*) dan gedung reaktor (*Level 5*). Jika dibandingkan dengan MSR, maka[11]:

- *Level 1* pelet dan *Level 2* kelongsong tidak diperlukan karena bahan bakar sudah dalam bentuk cair
- *Level 3* bejana tekan dan pipa diperlukan, akan tetapi persyaratannya lebih rendah karena tekanan operasi rendah
- *Level 4* penyungkup tidak diperlukan, akan tetapi pengungkung (*confinement*) temperatur tinggi karena kemungkinan terjadinya uap dan gas dari pendingin tidak ada
- *Level 5* gedung reaktor sama dengan LWR.

Desain reaktor mengenal adanya fungsi keselamatan yaitu, fungsi pemadaman reaktor, pendinginan reaktor dan fungsi penyungkupan/pengungkung radioaktif. Dalam reaktor MSR[12,13]:

- Fungsi pemadaman dilakukan dengan berbagai cara, cara pertama melalui keselamatan melekat, karena koefisien reaktivitas negatif daya yang sangat besar. Cara kedua adalah pemadaman yang cepat menggunakan batang kendali dapat dilakukan dengan mudah karena eksese reaktivitas teras sangat kecil. Disamping itu, tidak diperlukan jumlah batang kendali yang banyak. Cara ketiga adalah karena memiliki tangki pembuangan bahan bakar dengan cara gravitasi dengan katup yang dapat meleleh karena temperatur. Cara ketiga ini sangat efektif saat terjadi pecah pipa. Cara keempat, dengan mengatur komposisi bahan bakar garam dengan Th dimungkinkan mematikan reaktor dengan pengendalian bahan bakar.
- Fungsi pendinginan harus tetap dijamin meski terjadi pipa pecah. Karena reaktor MSR dioperasikan pada tekanan rendah, kebolehjadian terjadi pipa pecah sangat kecil. Sistem didesain mampu membuang bahan bakar ke tangki penyimpan meskipun terjadi pipa pecah. Tentu sistem penyimpan bahan bakar harus dilengkapi dengan pemindahan panas sisa. Reaktor MSR mungkin memiliki kemampuan sirkulasi alami ketika semua pompa berhenti, karena kehilangan tekanannya kecil. Ketika sirkulasi alami tidak dapat diandalkan, atau ketika sistem turbin diisolasi dan pendinginan oleh kalang sekunder tidak mungkin, maka diperlukan sistem pemindahan panas sisa. Sebagai pemindahan panas terakhir, sistem pendinginan panas sisa dengan pendingin udara statis dilakukan jika terjadi kecelakaan parah dalam jangka panjang, seperti terjadinya *station black-out*.
- Fungsi pengungkungan yang dipakai di MSR. Hal ini dimungkinkan karena setiap beroperasi beberapa hasil belah diambil dari sistem reaktor. Didukung dengan tekanan yang rendah maka dampak pelepasan radioaktif sangat kecil dibanding LWR. Karena tidak memerlukan air dan tidak dapat timbul gas yang dapat terbakar, maka sistem pengungkung MSR sangat baik integritasnya.

Kejadian kecelakaan dasar desain (DBA) dalam MSR yang penting diperhatikan adalah[14,15] :

1. Penambahan daya akibat kecelakaan insersi reaktivitas. Hal ini dimungkinkan jika batang kendali tertarik (tidak terkendali). Pencegahan: reaktor MSR memiliki umur hidup neutron serempak yang lebih panjang, sehingga fluks neutron lebih stabil.
2. Kecelakaan berkurangnya aliran. Terjadi karena pompa mengalami trip sehingga fungsi pendinginan tidak bekerja. Temperatur bahan bakar garam naik, demikian juga neutron kasiip bertambah sehingga terjadi penambahan reaktivitas. Akan tetapi karena memiliki koefisien reaktivitas negatif yang besar, maka hal ini dapat teratasi. Disamping itu dipersyaratkan dalam operasi, jika terjadi kejadian ini maka reaktor dipadamkan dengan batang kendali.
3. Bocornya bahan bakar garam. Dapat terjadi jika pipa mengalami pecah. Pencegahan dilakukan dengan mengalirkan bahan bakar ke tangki penyimpan dengan bantuan gravitasi dengan cara membuka katup.

## KESIMPULAN

Kajian keselamatan reaktor MSR menunjukkan bahwa desainnya memiliki keunggulan dibanding LWR. Simplifikasi sistem dan kondisi operasi sistem yang sederhana menjadi keunggulan utamanya. Disamping itu, keselamatan melekat dengan mengandalkan keselamatan pasif telah diterapkan dalam desainnya. Jumlah sistem keselamatan tidak serumit dan sebanyak di sistem LWR. Hal ini yang mengakibatkan reaktor MSR dapat beroperasi dengan biaya yang relatif murah. Akan tetapi yang menjadi kendala, karena reaktor MSR masih dalam fase reaktor riset, proses lisensi ke reaktor komersial memerlukan waktu. Diharapkan negara yang sedang melakukan riset MSR dengan serius, seperti

Amerika Serikat, Perancis dan Tiongkok, dapat segera mendemonstrasikan unjuk kerja reaktor ini sebagai reaktor daya untuk membuktikan seluruh desain bekerja dengan baik.

#### DAFTAR PUTAKA

1. Peraturan Pemerintah Nomor 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional
2. IAEA, A Joint Report by the OECD Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency, Uranium 2014: Resources, Production and Demand, OECD 2014
3. THOMAS J.DOLAN” Molten Salt Reactors and Thorium Energy”, *Annals of Nuclear Energy* 117 (2018) 1–2
4. ERLAN DEWITA, SRIYANA, “MOLTEN SALT REACTOR (MSR) dengan Daur Bahan Bakar Thorium”, *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir 2017, Makassar, 12 Oktober 2017*
5. BADAWY M. ELSHEIKH,” Safety assessment of molten salt reactors in comparison with light water reactors”, *Journal of radiation research and applied sciences* 6 (2013) 63 -70
6. CHRISTIAN LE BRUN,” Molten salts and nuclear energy production”, *Journal of Nuclear Materials* 360 (2007) 1–5
7. ZHIMIN DAI, “Thorium molten salt reactor nuclear energy system (TMSR)”, Shanghai Institute of Applied Physics (SINAP), Shanghai, China, 2017 Elsevier Ltd.
8. JIRÍ KRĚPEL, BORIS HOMBOURGER, CARLO FIORINA, KONSTANTIN MIKITYUK, ULRICH ROHDE, SÖREN KLIEM, ANDREAS PAUTZ,” Fuel cycle advantages and dynamics features of liquid fueled MSR”, *Annals of Nuclear Energy* 64 (2014) 380–397
9. GANGYANG ZHENG, HUALI WU, JIPU WANG, SIJUAN CHEN, YUNHUANG ZHANG,” Thorium-based molten salt SMR as the nuclear technology pathway from a market-oriented perspective”, *Annals of Nuclear Energy* 116 (2018) 177–186
10. JÉRÔME SERP, MICHEL ALLIBERT, ONDREJ BENES, SYLVIE DELPECH, OLGA FEYNBERG, VÉRONIQUE GHETTA, DANIEL HEUER, DAVID HOLCOMB , VICTOR IGNATIEV, JAN LEEN KLOOSTERMAN , LELIO LUZZI , ELSA MERLE-LUCOTTE , JAN UHLÍR, RITSUO YOSHIOKA, DAI ZHIMIN,” The molten salt reactor (MSR) in generation IV: Overview and perspectives”, *Progress in Nuclear Energy* 77 (2014) 308-319
11. TAKASHI KAMEI, SAEED HAKAMI,” Evaluation of implementation of thorium fuel cycle with LWR and MSR”, *Progress in Nuclear Energy* 53 (2011) 820-824
12. DAWID E. SERFONTEINA, EBEN J. MULDER,” Thorium-based fuel cycles: Reassessment of fuel economics and proliferation risk”, *Nuclear Engineering and Design* 271 (2014) 106–113
13. K. ANANTHARAMAN \*, V. SHIVAKUMAR, D. SAHA,” Utilisation of thorium in reactors”, *Journal of Nuclear Materials* 383 (2008) 119–121
14. U.S.NRC, Safety and Regulatory Issues of the Thorium Fuel Cycle, NUREG/CR-7176, ORNL/TM-2013/534
15. DAVID LEBLANCA,” Molten salt reactors: A new beginning for an old idea”, *Nuclear Engineering and Design* (2010)

#### DISKUSI/TANYA JAWAB :

##### 1. PERTANYAAN :

Tadi disebutkan bahwa U-233 adalah hasil biak dari Th-232. Apakah dalam penggunaan bahan bakar thorium dalam reaktor nuklir, maka Plutonium (Pu) yang dihasilkan akan lebih sedikit dibandingkan dengan apabila digunakan bahan bakar Uranium?

##### JAWABAN:

Memang penggunaan bahan bakar thorium akan dihasilkan plutonium yang lebih sedikit dibandingkan apabila digunakan bahan bakar uranium. Hal ini disebabkan Plutonium (Pu) dihasilkan dari isotop U-238 dimana apabila bereaksi dengan neutron akan dihasilkan Pu, sedangkan dalam bahan bakar thorium digunakan bahan fisil Uranium pengayaan rendah dan dalam jumlah kecil (hanya sebagai driver) saja. Karena konsentrasi U-238 juga lebih kecil dan Pu yang dihasilkan juga menjadi lebih sedikit dibandingkan apabila digunakan bahan bakar uranium.

**2. PERTANYAAN :**

Apakah plutonium yang dihasilkan dari reaksi thorium dapat lebih kecil dari uranium?

**JAWABAN:**

Reaksi thorium dengan neutron, tidak menghasilkan plutonium. Tetapi dari penggunaan bahan bakar thorium akan dihasilkan Plutonium dalam jumlah yang lebih sedikit dibandingkan apabila menggunakan bahan bakar uranium, karena penggunaan bahan bakar thorium harus dicampur dengan uranium atau bahan fisil lainnya sebagai *driver* dan dalam jumlah kecil, sehingga akan dihasilkan juga plutonium dalam jumlah yang lebih sedikit.

**3. PERTANYAAN :**

Untuk teknologi bahan bakar thorium sejauh mana perkembangan teknologinya? Dan sejauh mana status desainnya saat ini?

**JAWABAN:**

Di dunia, bahan bakar thorium, sebenarnya sudah digunakan sejak tahun 50-an yaitu digunakan sebagai bahan bakar reaktor THTR dan AVR dan masih menggunakan uranium pengayaan tinggi sebagai *driver*, sedangkan penggunaan bahan bakar thorium dengan dicampur uranium pengayaan rendah sebagai *driver* masih dalam penelitian dan pengembangan. namun penggunaan thorium untuk jenis reaktor lain seperti: MSR masih dalam TKT (Tingkat Kesiapan Teknologi) 5.

## **ANALISIS KESELAMATAN IRADIASI U-235 PENGKAYAAN RENDAH (LEU) DI *CENTRAL IRRADIATION POSITION (CIP)* REAKTOR RSG-GAS DENGAN BATAN-3DIFF**

**Sutrisno<sup>1</sup> dan Elisabeth Ratnawati<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Pusat Reaktor Serba Guna, BATAN  
Kawasan Puspiptek Gd 31, Serpong, Tangerang Selatan, 15310  
email: soe-tris@batan.go.id

### **ABSTRAK**

**ANALISIS KESELAMATAN IRADIASI U-235 PENGKAYAAN RENDAH (LEU) DI *CENTRAL IRRADIATION POSITION (CIP)* REAKTOR RSG-GAS DENGAN BATAN-3DIFF.** Pelayanan iradiasi U-235 pengkayaan rendah (LEU) di dalam teras reaktor RSG-GAS perlu ditingkatkan karena hasil produk molibdenum dibutuhkan ketersediannya secara kontinyu di Rumah Sakit. Adapun tempat iradiasi target adalah di *Central Irradiation Position (CIP)* karena posisi tersebut mempunyai fluks neutron yang tinggi. Studi ini bertujuan untuk menghitung dan menganalisis jumlah target LEU yang optimum di reaktor RSG-GAS. Ruang lingkup studi ini meliputi pemantauan batasan keselamatan operasi reaktor yaitu faktor puncak daya maksimum dan efek perubahan reaktivitas. Kajian ini adalah lanjutan dari yang telah dilakukan sebelumnya. Metodologi yang digunakan adalah perhitungan menggunakan paket program metode difusi neutron 3-dimensi (3-D) *BATAN-3DIFF* dan menganalisis efek faktor puncak daya maksimum, perubahan reaktivitas dan ketidakrataan fluks neutron. Pemodelan target LEU dibagi 4 bagian yaitu stringer, kapsul SS bagian atas, kapsul SS berisi target LEU dan SS bagian bawah. Generasi konstanta kelompok difusi menggunakan program WIMSD-5, dan perhitungan teras menggunakan program *BATAN-3DIFF*. Hasil perhitungan jika 2 posisi CIP (D-6 dan E-7) diisi penuh dengan massa optimal 18 gram (3g x 6 kisi) diperoleh perubahan reaktivitas 0,974%  $\Delta k/k$ ,  $PPF_{max} = 1,753$  dan *unbalance load* maksimum sebesar 2%. jika dibandingkan dengan safety margin sebesar 2%  $\Delta k/k$ ,  $PPF_{max} = 2,6$  dan *unbalance load* <16% maka seluruh parameter masih memenuhi syarat batas keselamatan operasi.

Kata kunci: iradiasi, LEU, posisi iradiasi, reaktor RSG-GAS, BATAN-3DIFF

### **ABSTRACT**

**SAFETY ANALYSIS OF THE U-235 (LEU) AT *CENTRAL IRRADIATION POSITION (CIP)* RSG-GAS REACTOR BY USING BATAN-3DIFF.** The service of U-235 low enrichment irradiation (LEU) in the RSG-GAS reactor core needs to be increased because the results of molybdenum products are needed routinely in Hospitals. The target irradiation site is at the *Central Irradiation Position (CIP)* because the position has a high flux. This study aims to analyze the number of optimum LEU targets in RSG-GAS. The scope of this study includes monitoring the safety limits of reactor operations, namely the maximum power peak factor and the effect of changes in reactivity and unbalance neutron flux. This program is a follow-up study that has been done before. The methodology used is to analyze the effect of maximum power peak factors and changes in reactivity. Modeling of LEU targets is divided into 4 parts are stringer, SS capsules upper, SS capsules containing lower LEU and SS targets. Generation of diffusion group constants is done by using the WIMSD-5 program, and core calculations by using the *BATAN-3DIFF* program. The calculation results if 2 positions of CIP (D-6 and E-7) are fully filled with an optimal mass of 18 grams (3g x 6 holes) obtained 0.974%  $\Delta k/k$  and  $PPF_{max} = 1.753$  and unbalance load maximum 2%. when compared with a safety margin of 2%  $\Delta k/k$ ,  $PPF_{max} = 2.6$  and unbalance load <16% so all parameters still meet the operational safety limit requirements.

Keyword: irradiation, LEU, irradiation position, RSG-GAS reactor, BATAN-3DIFF

### **PENDAHULUAN**

Reaktor RSG-GAS dalam menjalankan fungsi pelayanan iradiasi menerima target yang akan diiradiasi baik di fasilitas iradiasi dalam teras maupun di luar teras. Sampel yang dimasukkan ke dalam fasilitas iradiasi bisa menimbulkan gangguan reaktivitas, baik reaktivitas positif maupun reaktivitas negative. Target yang sering diiradiasi di dalam teras

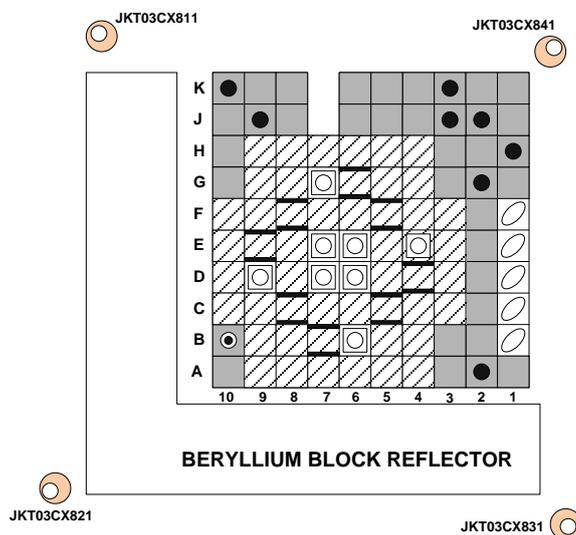
Reaktor RSG-GAS adalah  $\text{Sm}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TeO}_2$ ,  $\text{MoO}_3$ ,  $\text{Lu}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ , U-235 pengkayaan rendah (LEU) dan batu topaz. Masuknya U-235 pengkayaan rendah (LEU) ke dalam teras reaktor bisa menimbulkan pengaruh terhadap keselamatan operasi reaktor.

Pada saat ini permintaan pasar domestik maupun internasional untuk molybdenum terus meningkat, sehingga penentuan kapasitas optimum reaktor RSG-GAS mengiradiasi LEU perlu dilakukan. Kajian optimasi target U-235 dan batu topaz dengan ketinggian 45 cm telah dilakukan sebelumnya [1-3]. Penelitian yang lain optimasi untuk target tunggal ataupun campuran dengan target radioisotop lainnya seperti  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  (menghasilkan  $^{161}\text{Tb}$ ),  $\text{TeO}_2$  [3],  $\text{MoO}_3$  [4],  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  [5] telah dilakukan.. Analisis iradiasi target U-235 variasi massa dari 1 gram sampai dengan 3 gram di posisi CIP (D-6 dan E-7) belum pernah dilakukan. Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis iradiasi target U-235 dengan variasi massa di posisi CIP (D-6 dan E-7) atas gangguan reaktivitas, JKT03 dan factor puncak daya (PPF).

Dalam makalah ini perhitungan sel untuk *stringer*, target U-235 dengan massa 1 gram sampai dengan 3 gram dilakukan dengan program WIMSD-5B [6] yang telah tervalidasi untuk menghasilkan konstanta kelompok difusi. Perhitungan teras dilakukan dengan paket program metode difusi neutron 3-dimensi (3-D) *BATAN-3DIFF* [7] dalam model geometri X-Y-Z untuk menghitung perubahan reaktivitas,  $\text{PPF}_{\text{max}}$  dan pengaruh *unbalance detector* JKT03.

### DESKRIPSI TERAS RSG-GAS DAN TARGET LEU [1]

Reaktor RSG-GAS adalah reaktor riset jenis MTR (*Material Testing Reactor*) dengan daya nominal 30 MW (termal). Teras reaktor RSG-GAS disusun oleh 40 elemen bakar standar (EB) dan 8 elemen bakar kendali (EK) dan beberapa elemen reflektor berilium (Be) dalam  $10 \times 10$  posisi kisi teras seperti ditunjukkan dalam Gambar 1. Teras menyediakan beberapa posisi untuk iradiasi target yaitu CIP (*central irradiation position*), IP (*irradiation position*), PNRS (*pneumatic rabbit system*) dan HYRA (*hydraulic rabbit system*) yang masing-masing terdiri dari 4, 4, 1 dan 3 posisi kisi teras. Target yang membutuhkan waktu iradiasi yang lama menggunakan posisi CIP atau IP. Blok reflektor berilium berbentuk "L" diletakkan di dua sisi teras untuk meningkatkan fluks neutron yang akan dipakai di tabung berkas neutron yang diletakkan di blok reflektor tersebut. Bahan bakar menggunakan uranium silisida ( $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ ) pengkayaan rendah ( $\leq 19,75\%$ ) dengan tinggi aktif teras adalah 60 cm.

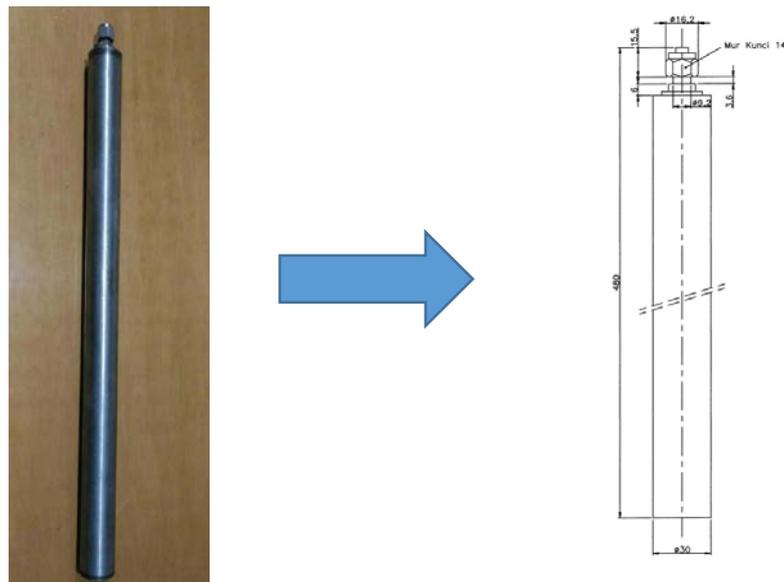


Gambar 1. Konfigurasi teras reaktor RSG-GAS dan Lokasi detektor *unbalance* JKT03 (CX811, CX821, CX831, and CX841)

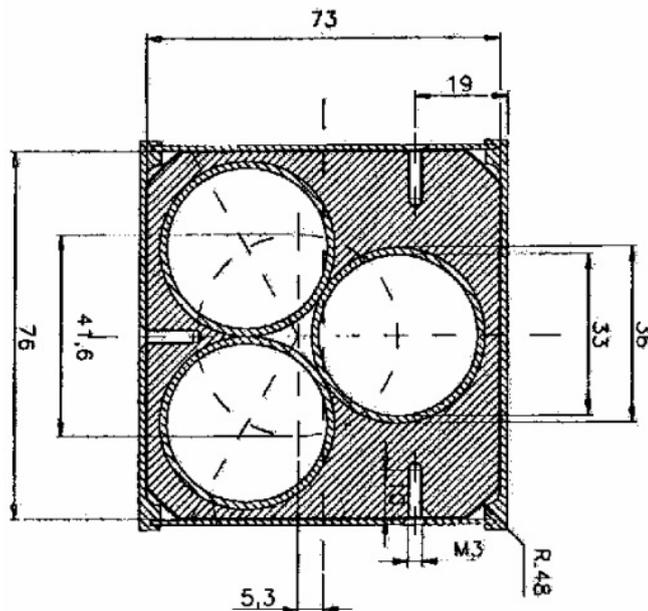
Posisi CIP dan IP dipakai untuk mengiradiasi target yang membutuhkan fluks neutron termal merata yang tinggi, seperti target untuk produksi isotop. Pada daya nominal, fluks neutron termal merata di CIP dan IP sebesar  $2 \times 10^{14}$  neutron  $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  [8]. Oleh karena itu CIP dan IP cocok digunakan untuk iradiasi batu topaz dan LEU dalam produksi radioisotop

<sup>99</sup>Mo. Saat ini CIP yang digunakan untuk iradiasi LEU adalah D-6 dan E-7 dan batu topaz seluruh posisi IP (B-6, D-9, E-4 dan G-7).

Tabung kapsul LEU dengan berat target LEU variasi dari 1 gram sampai dengan 3 gram ditunjukkan pada Gambar 2. Iradiasi target LEU dalam kapsul memerlukan *stringer* yang berfungsi sebagai pengarah agar target berada pada posisi yang ditentukan. *Stringer* yang digunakan di reaktor RSG-GAS tersaji dalam Gambar 3, yang diletakkan dalam satu posisi kisi teras, dengan demikian satu posisi kisi CIP dapat mengiradiasi 3 kapsul. Seluruh target dalam kapsul yang diiradiasi dalam reaktor RSG-GAS diletakkan di *stringer*. Penetapan *stringer* di CIP dengan adanya target LEU berada di D-6 dan E-7 yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 2. Tabung kapsul target LEU

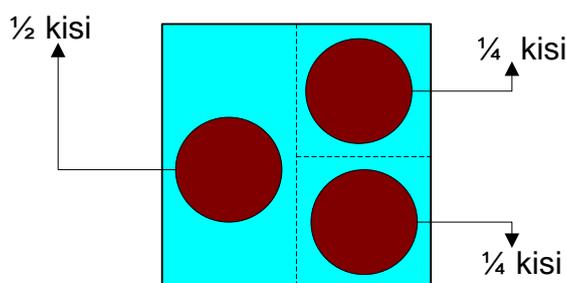


Gambar 3. *Stringer* kapsul target LEU

## METODOLOGI

Perhitungan sel *stringer* dan LEU dilakukan dengan paket program WIMSD5B untuk menggenerasi konstanta kelompok dalam 4 kelompok tenaga neutron dengan data nuklir ENDF/B-VII.1. Batas atas (*upper boundary*) kelompok tenaga neutron adalah 10 MeV, 0.821 MeV, 5,530 keV dan 0,625 eV. Sel target LEU dapat dimodelkan dalam 2 bagian, yaitu  $\frac{1}{2}$  kisi dan  $\frac{1}{4}$  kisi untuk setiap posisi di CIP sesuai dengan konfigurasi stringer yang digunakan. Model sel ini, seperti ditunjukkan dalam Gambar 4, telah digunakan dalam penelitian sebelumnya yang menggunakan *stringer* yang sama. Karena perhitungan teras dilakukan untuk 3-dimensi (3-D), maka seluruh bagian target dihomogenisasi dalam 1 sel sesuai dengan fraksi volume dari masing-masing material penyusun sel. Perhitungan sel dilakukan untuk:

1. Generasi konstanta kelompok difusi untuk target LEU dengan model  $\frac{1}{4}$  kisi dan  $\frac{1}{2}$  kisi posisi CIP masing-masing 1 g U-235.
2. Generasi konstanta kelompok difusi untuk target LEU dengan model  $\frac{1}{4}$  kisi dan  $\frac{1}{2}$  kisi posisi CIP masing-masing 2 g U-235.
3. Generasi konstanta kelompok difusi untuk target LEU dengan model  $\frac{1}{4}$  kisi dan  $\frac{1}{2}$  kisi posisi CIP masing-masing 3 g U-235.
4. Generasi konstanta kelompok difusi untuk target *stringer* dengan model  $\frac{1}{4}$  kisi dan  $\frac{1}{2}$  kisi posisi CIP.



Gambar 4. Model  $\frac{1}{2}$  dan  $\frac{1}{4}$  kisi posisi CIP untuk target LEU

Perhitungan teras menggunakan paket program *BATAN-3DIFF* sehingga teras penuh reaktor RSG-GAS, termasuk target, dimodelkan dalam model geometri X-Y-Z (3-D) dengan syarat batas vacuum di tiap sisi teras. Parameter teras yang dihitung adalah perubahan reaktivitas lebih teras ( $\Delta k/k$ ), pengaruh JKT03 dan perubahan faktor puncak daya maksimum ( $PPF_{max}$ ).

Reaktor RSG-GAS memiliki sistem deteksi ketidakseimbangan fluks neutron, disebut *unbalanced detector*, sebanyak 4 buah detektor *CIC* (*Compensated Ionization Chamber*) untuk mencegah terjadinya ketidak-simetrisan distribusi fluks neutron akibat ketidak-rataan posisi batang kendali atau kejadian penyumbatan celah bahan bakar. Gambar 1 menunjukkan posisi 4 detektor *unbalance*. Keempat detektor tersebut diberi nama JKT03 CX811, CX821, CX831 dan CX841. Jika hasil detektor menunjukkan perbedaan 16% maka reaktor akan *scram* untuk menghindari ketidak-rataan yang semakin besar.

Batasan yang digunakan dalam optimasi target batu topaz dengan U-235 perubahan reaktivitas target maksimum adalah sebesar 2%  $\Delta k/k$  dan perubahan faktor puncak daya maksimum ( $PPF_{max}$ ) tidak melebihi 2,6 dan pengaruh *unbalance detector* JKT03 lebih kecil dari  $\pm 16\%$ . Batasan ini dipilih untuk menjamin reaktor dalam keadaan aman sesuai batasan LAK (Laporan analisis Keselamatan) reaktor RSG-GAS [9-11].

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Perhitungan reaktivitas suatu target LEU di posisi CIP (D-6 dan E-7), sebelumnya diperlukan menghitung harga reaktivitas dan factor puncak daya (PPF) yang ditimbulkan akibat masuknya target *stringer* sebagai tempat iradiasi yang dimodelkan. Setiap *stringer* mempunyai 3 buah lobang iradiasi. Dimana hasil perhitungan tersebut untuk menghitung perubahan reaktivitas dari selisih harga yang ditimbulkan oleh masuknya LEU di *stringer*

tersebut. Perhitungan dilakukan dengan beberapa kombinasi posisi iradiasi, yaitu QtE71g artinya posisi iradiasi E-7 pada ¼ kisi atas diisi 1 g, QtQbE71g posisi iradiasi E-7 pada 2 buah ¼ kisi diisi 1 g dan AIIIE71g berarti seluruh posisi E-7 semua lobang diisi 1 g. Kemudian AIIIE7D6qt1g adalah posisi iradiasi E-7 semua lobang dan ¼ kisi bagian atas diisi 1 g, AIIIE7D6qtqb1g berarti posisi iradiasi E-7 semua lobang dan 2 buah ¼ kisi diisi 1 g. Dan AIIIE7D61g artinya semua lobang posisi iradiasi D-6 dan E-7 diisi 1g. Hasil perhitungan reaktivitas *stringer* dan LEU seberat 1 g ditunjukkan dalam Tabel 1 dan Gambar 5. Dari data tersebut setiap bertambahnya massa LEU setiap 1 gram maka harga reaktivitasnya akan berubah naik, namun penambahan tersebut tidak linear ini diakibatkan oleh ½ bagian diisi oleh 2 buah ¼ kisi dan kisi lainnya diisi ½ kisi sehingga setiap ½ bagian diisi ½ kisi bertambahnya reaktivitas tidak linear. Dari hasil perhitungan harga reaktivitas terbesar pada posisi D-6 dan E-7 seluruhnya diisi LEU 1 g atau semuanya berjumlah 6 gram dimana perubahan reaktivitasnya sebesar 0,80%,  $PPF_{rad\ max}=1,344$  di posisi F-8 dan  $PPF_{ax\ max}=1,3041$  di posisi C-7 sehingga  $PPF_{total}=1,7527$ .

Tabel 1. Harga PPF dan reaktivitas target dengan massa U-235 1 gram

	Massa (gram)	Nilai reaktivitas ( $\Delta k/k$ )	Perubahan reaktivitas	$PPF_{rad\ max}$	posisi	$PPF_{ax\ max}$	posisi	$PPF_{tot}$
Stringer	0	8.70E-02	0.00E+00	1.3011	F-8	1.2978	C-5	1.6886
QtE71g	1	8.79E-02	9.37E-04	1.3156	F-8	1.2993	D-5	1.7094
QtQbE71g	2	8.87E-02	1.65E-03	1.3221	F-8	1.3002	D-5	1.7190
AIIIE71g	3	9.08E-02	3.77E-03	1.3321	F-8	1.3031	D-5	1.7359
AIIIE7D6qt1g	4	9.29E-02	5.84E-03	1.3367	F-8	1.3058	D-5	1.7455
AIIIE7D6qtqb1g	5	9.34E-02	6.37E-03	1.3373	F-8	1.3057	D-5	1.7461
AIIIE7D61g	6	9.50E-02	8.04E-03	1.3440	F-8	1.3041	C-7	1.7527

Perhitungan reaktivitas,  $PPF_{rad\ max}$  dan  $PPF_{ax\ max}$  untuk LEU 2 g dilakukan seperti perhitungan pada massa LEU 1 g yaitu dengan menggunakan kombinasi posisi iradiasi, hasil perhitungan disajikan pada Tabel 2. Dari Tabel 2 dan Gambar 5 terlihat bahwa setiap penambahan LEU 2 g harga reaktivitasnya naik akan tetapi tidak linier seperti terjadi pada iradiasi LEU 1 g. Ketidak liniernya pun mengikuti tren iradiasi LEU 1 g. Dari hasil perhitungan harga reaktivitas terbesar pada saat posisi iradiasi D-6 dan E-7 diisi penuh LEU 2 g atau seberat 12 g dimana perubahan reaktivitasnya adalah sebesar 0,892 %,  $PPF_{rad\ max} = 1,3439$  dan  $PPF_{ax\ max} = 1,3047$  serta  $PPF_{total} = 1,7534$

Tabel 2. Harga PPF dan reaktivitas target dengan massa U-235 2 gram

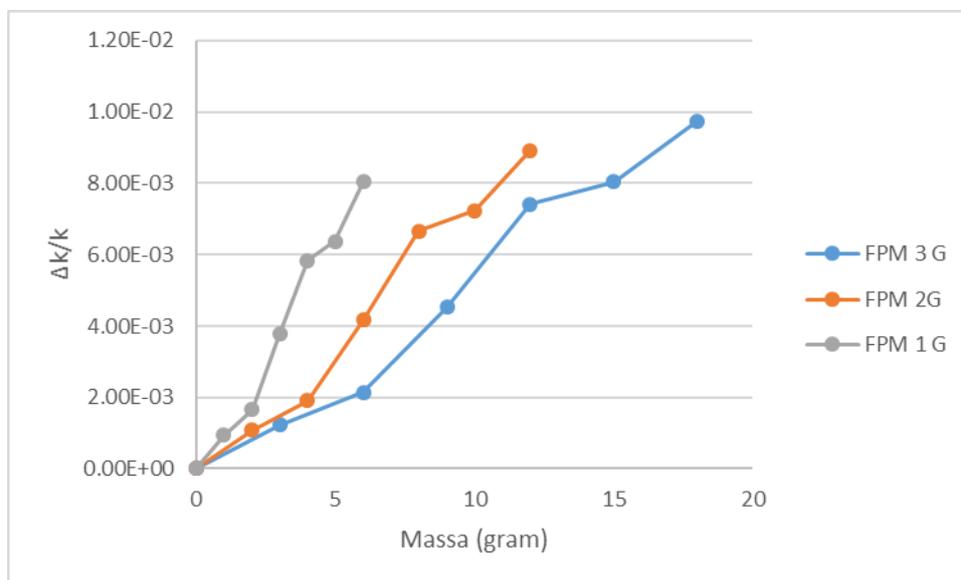
	Massa (gram)	Nilai reaktivitas ( $\Delta k/k$ )	Perubahan reaktivitas	$PPF_{rad\ max}$	posisi	$PPF_{ax\ max}$	posisi	$PPF_{tot}$
Stringer	0	8.70E-02	0.00E+00	1.3011	F-8	1.2978	C-5	1.6886
QtE72g	2	8.81E-02	1.08E-03	1.3169	F-8	1.2994	D-5	1.7112
QtQbE72g	4	8.89E-02	1.91E-03	1.3241	F-8	1.3005	D-5	1.7220
AIIIE72g	6	9.12E-02	4.16E-03	1.3342	F-8	1.3035	D-5	1.7391
AIIIE7d6qt2g	8	9.37E-02	6.66E-03	1.3372	F-8	1.3067	D-5	1.7473
AIIIE7d6qtqb2g	10	9.42E-02	7.23E-03	1.3375	F-8	1.3066	D-5	1.7476
Alle7d62g	12	9.59E-02	8.92E-03	1.3439	F-8	1.3047	C-7	1.7534

Perhitungan reaktivitas,  $PPF_{rad\ max}$  dan  $PPF_{ax\ max}$  untuk LEU 3 g dilakukan seperti perhitungan pada massa LEU 1 g dan 2 g yaitu dengan menggunakan kombinasi posisi iradiasi, hasil perhitungan disajikan pada Tabel 3. Dari Tabel 3 dan Gambar 5 terlihat bahwa setiap penambahan LEU 3 g harga reaktivitasnya naik akan tetapi tidak linier seperti terjadi pada iradiasi LEU 1 g dan 2 g. Ketidak liniernya pun mengikuti tren iradiasi LEU 1 g dan 2 g. Dari hasil perhitungan harga reaktivitas terbesar pada saat posisi iradiasi D-6 dan E-7 diisi penuh

LEU 3 g atau seberat 18 g dimana perubahan reaktivitasnya adalah sebesar 0,974 %,  $PPF_{rad\ max}$  = 1,3362 dan  $PPF_{ax\ max}$  = 1,3038 serta  $PPF_{total}$  = 1,7421

Tabel 3 Harga PPF dan reaktivitas target dengan massa U-235 3 gram

	Massa (gram)	Nilai reaktivitas ( $\Delta k/k$ )	Perubahan reaktivitas	$PPF_{rad\ max}$	posisi	$PPF_{ax\ max}$	posisi	$PPF_{tot}$
Stringer	0	8.70E-02	0.00E+00	1.3055	F-8	1.2986	C-5	1.6953
QtE73g	3	8.82E-02	1.22E-03	1.3180	F-8	1.2995	D-5	1.7127
QtQbE73g	6	8.92E-02	2.15E-03	1.3258	F-8	1.3007	D-5	1.7245
AllE73g	9	9.15E-02	4.54E-03	1.3362	F-8	1.3038	D-5	1.7421
AllE7d6qt3g	12	9.44E-02	7.42E-03	1.3377	F-8	1.3075	D-5	1.7490
AllE7d6qtqb3g	15	9.50E-02	8.04E-03	1.3377	F-8	1.3075	D-5	1.7490
Alle7d63g	18	9.68E-02	9.74E-03	1.3362	F-8	1.3038	F-7	1.7421



Gambar 5. Gambar reaktivitas variasi massa LEU pada CIP

Gambar 5 adalah grafik hubungan massa antara target LEU dengan perubahan reaktivitas  $\Delta k/k$ , dari Gambar 5 menunjukkan bahwa iradiasi dengan massa LEU 1 g, 2 g, 3 g mempunyai tren yang sama yaitu naik akan tetapi tidak linier yang sudah dijelaskan di atas. Untuk massa iradiasi LEU yang sama 2g yaitu 2 x 1g (Tabel 1) dan 1 x 2g (Tabel 2) dan pada Gambar 5, harga perubahan reaktivitas yang terbesar yaitu pada penambahan 2 x 1g. Perubahan reaktivitas untuk massa yang sama 3g yaitu 3 x 1g (Tabel 1) dan 1 x 3 g (Tabel 3) dan pada Gambar 5, perubahan reaktivitas yang terbesar pada penambahan 3 x 1g. Sedangkan untuk iradiasi LEU dengan massa 6 gram yaitu 6 x 1 g (Tabel 1), 3 x 2 g (Tabel 2) dan 2 x 3g (Tabel 3) perubahan reaktivitas terbesar terjadi pada 6 x 1g. Kalau menginginkan perubahan reaktivitas yang kecil maka yang diiradiasi adalah massa yang 3 gram.

Dari perhitungan di atas menunjukkan untuk massa LEU 3 gram yang diisikan pada 6 kisi (D-6 dan E-7) atau sebesar 18 gram mempunyai harga reaktivitas  $\Delta k/k$  sebesar 0,974% dan  $PPF_{total}$  = 1,7421, harga ini masih di bawah batas yang diijinkan.

Tabel 4. Harga *Unbalance load detector* JKT03

		Unbalance load JKT03
stringer	81.62 %	0 %
AlIE6D71g	83.41 %	1.79 %
AlIE6D72g	83.52 %	1.90 %
AlIE6D73g	83.62 %	2.00 %

Tabel 4 menunjukkan nilai hasil perhitungan *unbalance load detector* JKT03 pada *stringer*, LEU 1 gram, LEU 2 gram dan LEU 3 gram. Sebagai acuan dasar perhitungan adalah *stringer* yaitu seluruh hasil perhitungan *unbalance load* JKT 03 LEU 1 gram, LEU 2 gram dan LEU 3 gram dikurangi hasil perhitungan *stringer*.

Jika dipakai rumus perhitungan *unbalance load detector* JKT 03 seperti disajikan di penelitian sebelumnya [11], hasil eksperimen fluks neutron menunjukkan bahwa besarnya *unbalance* sebesar 2,37%. Hasil perhitungan menunjukkan *unbalance* sebesar 1,79 % untuk 6 gram (D-6 dan E7 diisi 1 gram), 1,90% untuk 12 gram (D-6 dan E7 diisi 2 gram) dan 2% untuk 18 gram (D-6 dan E7 diisi 3 gram) semua hasil perhitungan ini di bawah harga eksperimen, dan semua gangguan *unbalance load detector* masih di bawah dari harga yang diijinkan yaitu <16%.

#### KESIMPULAN

Hasil analisis perhitungan dengan *BATAN-3DIFF* menunjukkan bahwa jika posisi CIP (D-6 dan E-7) digunakan untuk iradiasi target LEU dengan massa 1, 2 dan 3 gram per kapsul, maka yang optimum adalah dengan massa LEU 3 gram per kisi atau dengan jumlah LEU 18 gram dimana perubahan reaktivitas  $\Delta k/k$  maksimum sebesar 0,974%,  $PPF_{total} = 1,7421$  dan *unbalance load detector* JKT03 sebesar 2% dan tidak ada yang melampaui batasan keselamatan dimana  $\Delta k/k$  sebesar 2%,  $PPF_{total}$  2,6 dan *unbalance load* < 16%.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Sutrisno, "ANALISIS OPTIMASI TARGET 235 U PENGKAYAAN RENDAH (LEU) UNTUK MENDUKUNG PRODUKSI 99 Mo DAN TARGET BATU TOPAZ DI REAKTOR RSG-GAS OPTIMIZATION ANALYSIS OF THE LEU ( 235 U) TARGET FOR 99 Mo PRODUCTION SUPPORT WITH THE TOPAZ STONE TARGETS IN RSG-GAS REACTOR," *Ganendra, J. Iptek Nukl.*, vol. 21 No.1, pp. 25–35, 2018.
- [2] M. Ahmad, G. Vandegrift, and P. Cristini, "Molybdenum-99 ( 99 Mo ): Past , Present , and Future," *Sci. Technol. Nucl. Install.*, vol. 2014, 2014.
- [3] B. El Bakkari, B. Nacir, T. El Bardouni, C. El Younoussi, Y. Boulaich, and H. Boukhal, "Annals of Nuclear Energy Feasibility analysis of I-131 production in the Moroccan TRIGA research reactor," *Ann. Nucl. Energy*, vol. 78, pp. 140–145, 2015.
- [4] I. Saptiama and E. Sarmini, "AKTIVASI NEUTRON DARI MOLIBDENUM ALAM UNTUK MEMPEROLEH TEKNESIUM-99m ( 99m Tc )," *Urania*, vol. 22 No 2, pp. 121–132, 2016.
- [5] S. D. Alfathia Dara ayu, Hastiawan Iwan, "Pembuatan Radioiodida-131," *Sains dan Teknol. Nukl. Indones.*, vol. 131, pp. 61–72, 2017.
- [6] A. T. Aldama, D. Lopez, Leszczynski, F, "WIMS-D Library Update," no. December, 2003.
- [7] T. M. Sembiring and P. H. Liem, "Validation Of BATAN-3DIFF Code On 3-D Model Of The IAEA 10 MWTH Benchmark Core For Partially- Inserted Control Rods," pp. 91–100.
- [8] A. Hamzah *et al.*, "PENGUKURAN DAN PERHITUNGAN FLUKS DAN SPEKTRUM NEUTRON DI FASILITAS SISTIM RABBIT REAKTOR RSG - GAS Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir - BATAN Pusat Reaktor Serba Guna - BATAN," vol. 20, no. 1, pp. 1–12.
- [9] Pusat Reaktor Serba Guna-BATAN, "Laporan Analisis Keselamatan Iradiasi Target FPM-LEU Electroplating," *Lap. Anal. Keselam.*, 1993.
- [10] Sutrisno, R. Elisabeth, and H. Prijanto, "Verifikasi Pengukuran Arus Detektor JKT03 Reaktor RSG-GAS." Seminar Nasional XII SDM Teknologi Nuklir, Yogyakarta, pp.

- 225–232, 2016.
- [11] T. M. Sembiring and Dkk, "PRELIMINARY ANALYSIS OF THE UNBALANCED LOAD DETECTION SYSTEM IN THE RSG-GAS REACTOR."

## PERAWATAN PREDIKTIF JARINGAN LISTRIK SIKLOTRON MENGUNAKAN *THERMOGRAPHY* INFRAMERAH

I Wayan Widiana, Parwanto, Edi Slamet Riyanto dan Rajiman

Pusat Teknologi Radioisotop dan Radiofarmaka (PTRR) BATAN

Gedung 11 Kawasan Puspiptek, Setu, Tangerang Selatan, 15315

email: [wayan\\_nane@batan.go.id](mailto:wayan_nane@batan.go.id)

### ABSTRAK

**PERAWATAN PREDIKTIF JARINGAN LISTRIK SIKLOTRON MENGGUNAKAN *THERMOGRAPHY* INFRAMERAH.** Jaringan listrik dalam Instalasi Nuklir merupakan salah satu faktor penentu keberlangsungan stabilitas pasokan listrik. Perawatan prediktif yang mengarah pada pemeliharaan proaktif dapat dilakukan untuk memberikan solusi tersebut. Teknik thermography inframerah menjadi alternatif yang dapat dilakukan untuk melakukan perawatan prediktif pada jaringan listrik. Pada kegiatan ini penulis menggunakan jaringan listrik siklotron yang terdapat di PTRR BATAN sebagai obyek inspeksi. Hasil inspeksi menunjukkan adanya beberapa indikasi berupa disipasi panas yang berlebih pada beberapa komponen dalam jaringan listrik siklotron. Indikasi tersebut cukup akurat untuk mengarahkan user dalam melakukan pemeriksaan lebih lanjut terhadap komponen tertentu yang direkomendasikan.

Kata kunci: Jaringan listrik, perawatan prediktif, thermography, inframerah

### ABSTRACT

**PREDICTIVE MAINTENANCE OF CYCLOTRON ELECTRIC SYSTEMS USING INFRARED THERMOGRAPHY.** *The electricity network in Nuclear installation is one of the main facilities which is a determining factor in the sustainability of electricity supply stability. Predictive maintenance that leads to proactive maintenance can be done to provide the solution. Infrared thermography technique is an alternative that can be done to perform predictive maintenance on electricity networks. In this activities, the author uses the cyclotron electricity network contained in PTRR BATAN as the object of inspection. The inspection results indicate that there are several indications of excessive heat dissipation in some components in the cyclotron electricity network. These indications are accurate enough to direct the user to conduct further checks on certain recommended components.*

*Keywords: electricity network, predictive maintenance, thermography, infrared*

### PENDAHULUAN

Dalam segala bentuk proses produksi yang melibatkan mesin-mesin produksi dan fasilitas produksi lainnya akan membutuhkan listrik sebagai sumber energi utamanya[1]. Sampai saat ini Perusahaan Listrik Negara (PLN) telah memberikan pasokan listrik dari berbagai sumber pembangkit listrik[2]. Dari berbagai jenis pembangkit listrik yang ada terdapat bagian penting yang perlu mendapatkan perhatian khusus, agar kestabilan pasokan listrik yang dihasilkan oleh pembangkit listrik dapat terjaga dengan baik. Bagian tersebut adalah **jaringan listrik** yang berfungsi menyalurkan listrik dari pembangkit listrik sampai listrik tersebut dapat digunakan oleh masyarakat[3]. Tenaga nuklir sebagai salah satu alternatif pembangkit listrik telah digunakan di beberapa negara di dunia. Di Indonesia Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) sedang dibahas untuk dapat diaplikasikan sebagai energi terbarukan yang dapat menggantikan jenis pembangkit listrik lainnya[4]. Jaringan listrik dalam instalasi nuklir memiliki pendekatan yang sama dengan instalasi jaringan listrik pada PLTN. Dengan demikian perlakuan pemeliharaan yang dilakukan dalam instalasi nuklir dapat diterapkan dalam pemeliharaan jaringan listrik PLTN. Pusat Teknologi Radioisotop dan Radiofarmaka (PTRR) merupakan salah satu instalasi nuklir yang memiliki fasilitas siklotron. Tindakan pemeliharaan terhadap jaringan listrik diperlukan untuk menjaga keberlangsungan pasokan listrik ke siklotron, mulai dari perawatan berkala, perbaikan insidental bahkan sampai dengan penggantian komponen maupun unit. Pada tulisan ini penulis menyampaikan kegiatan perawatan jaringan listrik secara prediktif dan tidak merusak. Obyek jaringan listrik yang digunakan adalah jaringan listrik untuk fasilitas siklotron

CS-30 yang berada di gedung 11 PTRR BATAN kawasan Puspiptek Tangerang Selatan. Dalam kegiatan ini dilakukan inpeksi terhadap jaringan listrik baik berupa komponen-komponen yang ada dalam panel utama maupun panel distribusi, kabel-kabel penghubung antar panel dan kabel penghubung beban serta inpeksi terhadap beban listrik yang sedang dioperasikan. Hasil inspeksi akan memberikan gambaran terjadinya penyebaran panas sehingga akan lebih mudah mendiagnosa anomali yang mungkin terjadi pada jaringan listrik yang sedang beroperasi.

## TEORI

### Model Pemeliharaan

Pada saat ini terdapat empat model pemeliharaan yang dikenal masyarakat yaitu *breakdown maintenance*, pemeliharaan preventif, pemeliharaan prediktif dan pemeliharaan proaktif[5].

Model *breakdown maintenance* merupakan tindakan perbaikan yang dilakukan setelah terjadi kerusakan. Model seperti ini sebaiknya dihindari atau hanya menjadi alternatif terakhir karena dapat menimbulkan kegagalan dan kecelakaan dengan probabilitas yang tinggi. Dalam hal ini kegagalan atau kecelakaan tersebut dapat menimbulkan kerugian materi bahkan nyawa manusia. Biaya yang dibutuhkan untuk model *breakdown maintenance* cukup mahal karena harus mengganti komponen yang rusak saat itu juga padahal tidak tertuang dalam rencana anggaran dan belanja.

Pemeliharaan preventif adalah model pemeliharaan yang berdasarkan pada perkiraan waktu umur sebuah komponen. Model ini memungkinkan untuk penyediaan *spare part* lebih terencana terutama untuk komponen-komponen kritis. Dengan model pemeliharaan preventif diperkirakan dapat menghemat biaya sekitar 75% dibanding *breakdown maintenance*[6]. Akan tetapi, model pemeliharaan preventif memiliki kelemahan karena tidak terlihat kondisi yang sebenarnya dari komponen tersebut. Terdapat kemungkinan kesalahan desain maupun kesalahan pengoperasian dapat mengakibatkan sebuah komponen mempunyai umur di bawah perkiraan. Hal ini dapat mengarah pada kecelakaan dini.

Kemudian dikembangkan model pemeliharaan secara prediktif yang didasarkan pada pantauan suatu kondisi atau kinerja suatu peralatan. Kondisi-kondisi yang dapat dimonitor antara lain vibrasi, temperatur, kelembaban, konsumsi arus listrik, putaran motor (rpm), unsur kimia dan lain-lain. Berdasarkan data-data yang diperoleh dari pemeliharaan secara prediktif maka akan diketahui dengan segera nilai-nilai yang menyimpang pada saat terjadi anomali. Diperkirakan pemeliharaan secara prediktif dapat menghemat biaya sekitar 60% dibandingkan dengan pemeliharaan secara preventif.

Model terakhir adalah pemeliharaan proaktif yang mengacu pada suatu kegiatan pemeliharaan yang bertujuan mengantisipasi terjadinya kegagalan. Contoh kegiatan antisipasi tersebut antara lain; revisi desain ataupun penambahan komponen dalam rangka memperpanjang umur suatu peralatan. Hal ini dapat dilakukan karena telah diketahui secara pasti adanya kecenderungan kondisi atau fenomena yang dapat merusak peralatan.

### Inspeksi *Thermography* Pada Jaringan Listrik

*Thermography* infra merah adalah teknik pencitraan yang memanfaatkan energi infra merah yang dihasilkan oleh sebuah benda. Infra merah adalah pancaran panas radiasi yang merupakan fungsi dari temperatur dan *emittance* material sebuah objek. Semakin panas suatu benda maka semakin besar energi yang dipancarkan dan semakin terang terang warna benda tersebut. Sebaliknya, semakin gelap warna benda maka semakin kecil radiasi yang dipancarkan (warna hitam memiliki  $emittance = 1$ )[7]. *Thermography* infra merah yang memanfaatkan pada perubahan temperatur mudah diaplikasikan pada jaringan listrik yang sedang beroperasi. Dengan membiarkan arus yang mengalir melalui suatu komponen, maka temperatur yang terukur adalah perubahan panas yang terjadi akibat arus yang mengalir pada sebuah beban yang mengikuti kaedah hukum Ohm. Semakin besar arus yang mengalir maka semakin besar daya yang diterapkan sehingga semakin besar panas yang terdisipasi. Inspeksi menggunakan kamera infra merah pada jaringan listrik yang sedang beroperasi menghasilkan sebuah pola temperatur [8]. Berdasarkan pola temperatur tersebut kemudian dilakukan analisa menggunakan software. Pengamatan dilakukan dengan memperhatikan disipasi panas dan biasanya dibandingkan dengan standar atau panas yang ditimbulkan saat kondisi normal. Standar yang banyak digunakan dalam beberapa penelitian seperti terlihat pada Tabel 1 yang merupakan standar yang dikeluarkan oleh *Electric Power Research Institute* (EPRI) yaitu sebuah organisasi yang melakukan

penelitian tentang industri tenaga listrik di Amerika Serikat[6], [8]. Selain itu pihak produsen kamera infra merah juga memberikan standar yang sama seperti yang dikeluarkan oleh FLIR yang terlihat pada Tabel 3. Dengan diketahui adanya anomali secara dini maka perawatan atau perbaikan terhadap komponen tersebut dapat dilakukan sebelum terjadi kerusakan sehingga kegagalan ataupun kecelakaan dapat dihindari.

Tabel 1. Standar Inspeksi *Thermography*

Differential Temp. / Max. Temp.	<5 °C	(5 – 10) °C	(11 – 20) °C	(21 – 40) °C	>40 °C
< 75 °C	Normal	Rendah	Menengah	Tinggi	Kritis
(75 – 100) °C	Peringatan beban lebih	Menengah	Tinggi	Kritis	Kritis
>100 °C	Peringatan beban tinggi	Kritis	Kritis	Kritis	Kritis

Keterangan:

Rendah	Memerlukan pemantauan dan pemeriksaan awal
Menengah	Memerlukan perhatian
Tinggi	Memerlukan perhatian segera
Kritis	Memerlukan perbaikan langsung

Tabel 2. Referensi suhu operasi pada beberapa obyek menurut EPRI

No.	Obyek	Referensi Suhu Operasi (°C)
1	Terminasi biasa	45
2	Body Transformator	60
3	Terminasi Trafo	55
4	Terminasi Breaker	45
5	ACB	60
6	Breaker Besar	60
7	Breaker Kecil	55
8	MCB Besar	55
9	MCB Kecil	45
10	Kontaktor Besar	70
11	Kontaktor Kecil	65
12	Overload Relay	55
13	Sambungan Kontaktor-Overload	75
14	Switch	60
15	Fuse	50
16	Motor 1 s.d 2 PK	60
17	Motor > 10 PK	115

Tabel 3. *Standard of Thermography Inspection FLIR*

No	Kenaikan Temperatur (°C)	Rekomendasi	Kelas
1	0-9	Pemantauan	0
2	10-29	Perbaikan pada periode berikutnya	1
3	30-50	Perbaikan tidak terjadwal	2
4	>50	Perbaikan segera	3

## METODOLOGI

### Bahan dan Peralatan

Bahan yang digunakan sebagai obyek penelitian adalah jaringan listrik siklotron yang terdiri dari Panel Utama listrik Siklotron, Panel Penstabil Tegangan, Panel Distribusi, Panel Beban sampai dengan jaringan listrik menuju beban. Di dalam beberapa panel tersebut terdapat komponen-komponen seperti MCB, ACB, metering, bus bar, transformator, relay dan lain sebagainya.

Sedangkan peralatan yang digunakan dalam kegiatan ini adalah, Kamera Infra Merah FLIR i50 yang digunakan untuk pengambilan gambar, *FLIR tools Thermal Analysis and Reporting software* yang digunakan untuk melakukan analisa distribusi atau disipasi panas, serta peralatan pendukung seperti toolset dan komputer[9].

### Metodologi

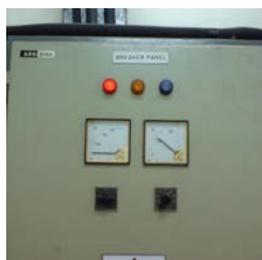
Metodologi yang digunakan dalam kegiatan ini adalah dengan melakukan analisis pencitraan panas (thermal) terhadap materi yang berada dalam jaringan listrik siklotron. Pencitraan panas tersebut dihasilkan oleh kamera infra merah. Hasil pencitraan diolah dengan menggunakan *FLIR tools Thermal Analysis and Reporting software*. Analisis dilakukan terhadap jaringan listrik siklotron meliputi Panel utama listrik Siklotron, Panel Penstabil Tegangan, Panel Distribusi, Panel Beban sampai dengan jaringan listrik menuju beban. Hasil analisa kemudian dibandingkan dengan standar untuk dapat direkomendasikan tindakan prioritas yang dapat dilakukan.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Analisa thermal jaringan listrik pada Panel Utama Siklotron

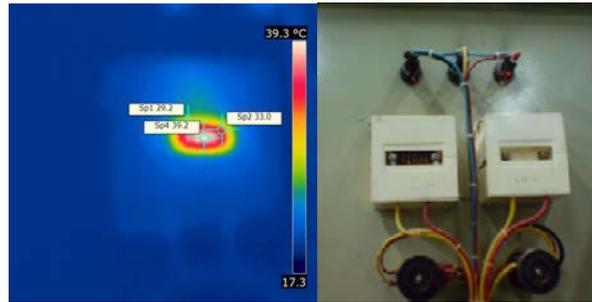
Panel utama siklotron yang dimaksud adalah Panel yang terdapat di dalam ruang *Power Supply* yang merupakan titik awal pasokan listrik menuju jaringan siklotron. Gambar 1 adalah panel utama listrik Siklotron. Di dalam panel utama siklotron terdapat komponen utama berupa *Air Circuit Breaker (ACB)* yang berfungsi memutus aliran listrik menuju siklotron. Selain itu terdapat beberapa komponen pendukung seperti meter tegangan, meter konsumsi arus dan komponen sensor arus serta. Pencitraan dari kamera infra merah menunjukkan beberapa komponen memiliki titik yang memiliki disipasi panas akibat dari beberapa faktor seperti faktor operasi normal (aliran arus listrik sesuai kapasitasnya), faktor arus berlebih, faktor penuaan komponen (aging) dan lain-lain.

Gambar 2 dan Gambar 3 menunjukkan komponen pada panel utama sistem listrik siklotron yang mengalami disipasi panas. Komponen tersebut adalah meter tegangan dan sensor kelebihan beban. Pada meter tegangan terdapat terjadi disipasi panas pada bagian belakang, tepatnya pada komponen resistor yang tersusun berjejer.



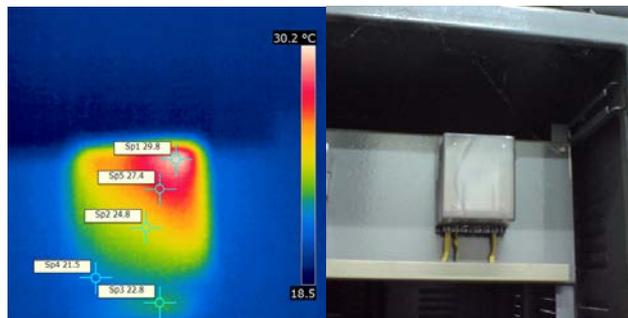
Gambar 1. Panel Utama Sistem Listrik Siklotron

Pada analisa menggunakan software diperoleh titik thermal tertinggi mencapai 39.2 °C, sementara disisi lainya disipasi panas rata-rata 20 °C. Namun dengan mengacu pada standar suhu operasi terhadap beberapa obyek dengan nilai rata-rata tidak kurang dari 50 °C maka disipasi suhu pada komponen meter voltage dinyatakan dalam kondisi normal.



Gambar 2. Disipasi panas pada meter voltage

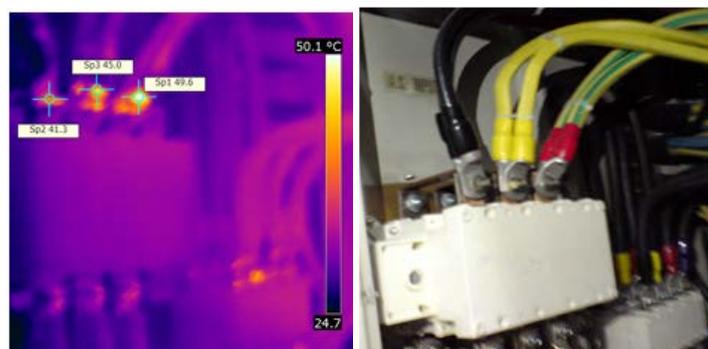
Pada sensor arus terdapat titik panas dengan titik terpanas mencapai suhu 29.8 °C (Gambar 3). Secara visual terdapat beberapa titik terminasi kabel terdapat di dalam unit tersebut. Jika dibandingkan dengan standar batasan suhu operasi maka unit sensor arus tersebut masih berada pada batas normal, namun jika dibandingkan dengan beberapa titik terminasi lainnya yang ada di unit tersebut maka terdapat selisih sekitar 8 °C. Dan tindakan yang disarankan adalah melakukan pemantauan rutin untuk mengamati pertambahan atau kenaikan suhu.



Gambar 3. Disipasi panas pada komponen sensor arus

#### Analisa thermal pada jaringan listrik Panel Penstabil Tegangan

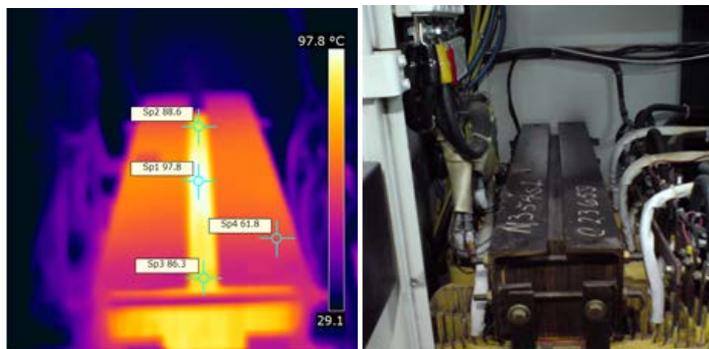
Gambar 4 menunjukkan disipasi panas pada terminasi kabel 3 phase pada *Change Over Switch* (COS) yang terdapat pada Panel Penstabil Tegangan. Dari ketiga terminal tersebut terdapat perbedaan suhu sekitar 4 °C, dan secara keseluruhan suhu maksimal yaitu 49.6 °C masih berada di bawah suhu standar. Sehingga komponen tersebut masih dinyatakan normal.



Gambar 4. Disipasi panas pada COS Panel Penstabil tegangan

Gambar 5 menunjukkan disipasi panas yang terjadi pada transformator utama yang terdapat pada Panel Penstabil Tegangan. Analisa menggunakan software menunjukkan

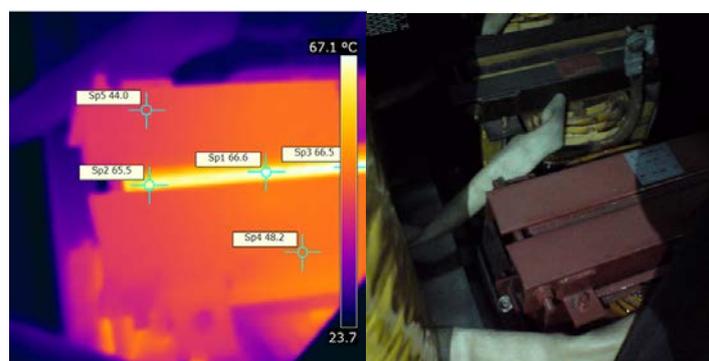
adanya disipasi panas pada bagian atas trafo maksimal sebesar 97.8 °C. Referensi menyatakan bahwa untuk body trafo besar mempunyai suhu operasi sebesar 60 °C. Kemudian jika mengacu pada Tabel 1 maka perbedaan suhu tersebut berada pada kategori “tinggi” dengan rekomendasi “memerlukan perhatian sesegera mungkin”.



Gambar 5. Disipasi panas pada Trafo utama sistem penstabil tegangan

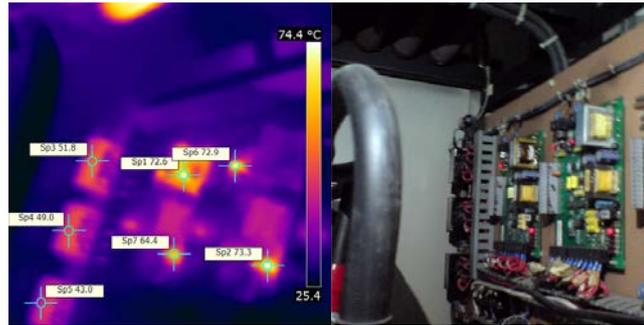
Jika mengacu pada Tabel 3 maka termasuk kategori kelas 2 dengan range kenaikan suhu antara 30-40 °C. Rekomendasinya adalah *schedule unplanned outage* atau dapat dilakukan perbaikan tanpa direncanakan (sewaktu-waktu).

Sementara itu Gambar 6 menunjukkan disipasi panas yang terjadi pada trafo phase R. Jika mengacu pada referensi suhu operasional trafo besar (60 °C) maka suhu maksimal pada body trafo phase R (66.6 °C) berada pada kategori “rendah atau kelas 0” dengan tindakan rekomendasi adalah “monitor atau pemeriksaan awal”.



Gambar 6. Trafo phase R mengalami disipanas berlebih dibandingkan phase S dan phase T

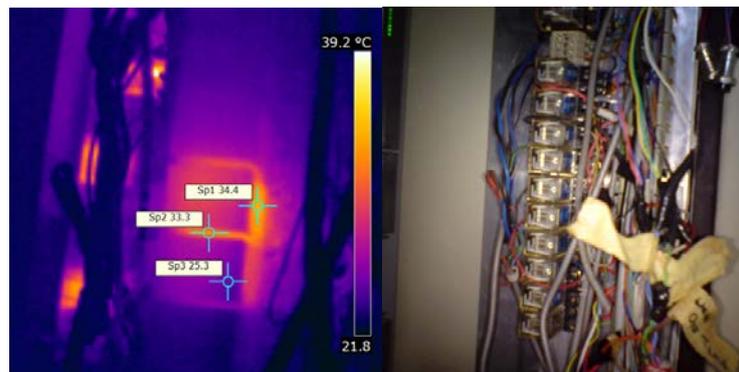
Gambar 7 adalah modul penstabil tegangan, beberapa komponen memiliki disipasi panas antara 40 °C sampai dengan 72.6 °C. Suhu tertinggi berada pada komponen berupa trafo. Jika operasi normal menghasilkan suhu maksimal 60 °C maka terjadi kenaikan suhu di atas normal sekitar 12.6 °C. Kondisi tersebut masuk pada kategori ringan dengan rekomendasi untuk melakukan perbaikan pada rencana berikutnya.



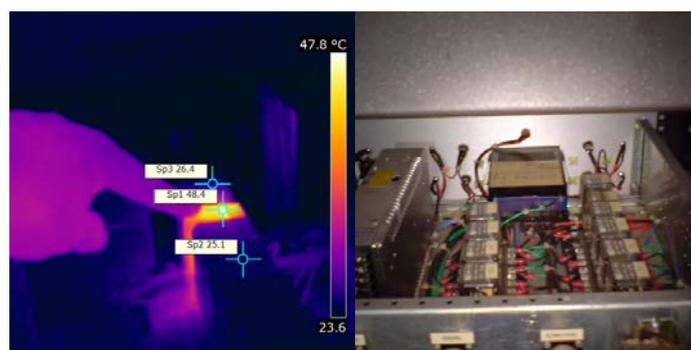
Gambar 7. Disipasi panas pada modul penstabil tegangan

### Analisa thermal pada panel kontrol siklotron

Panel kontrol siklotron merupakan sebuah panel yang berfungsi untuk melakukan kegiatan pengoperasian siklotron. Beberapa parameter dapat terbaca dari panel kontrol siklotron. Inspeksi termography infra merah dilakukan dengan pengambilan gambar terhadap beberapa komponen yang sedang beroperasi dengan energi listrik. Gambar 8 dan Gambar 9 menunjukkan disipasi panas yang terjadi pada komponen relay. Panas tertinggi yang terbaca pada relay tersebut adalah 34.4 °C dan 48.4 °C. Nilai tersebut berada dalam batas normal.

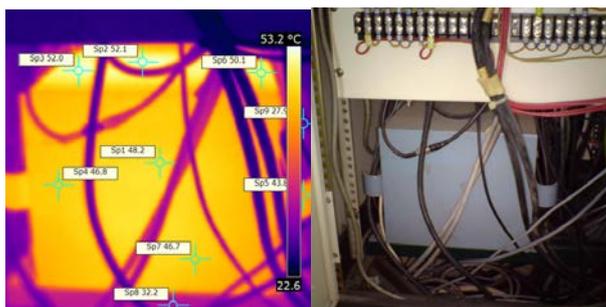


Gambar 8. Disipasi panas pada komponen relay pada panel kontrol siklotron



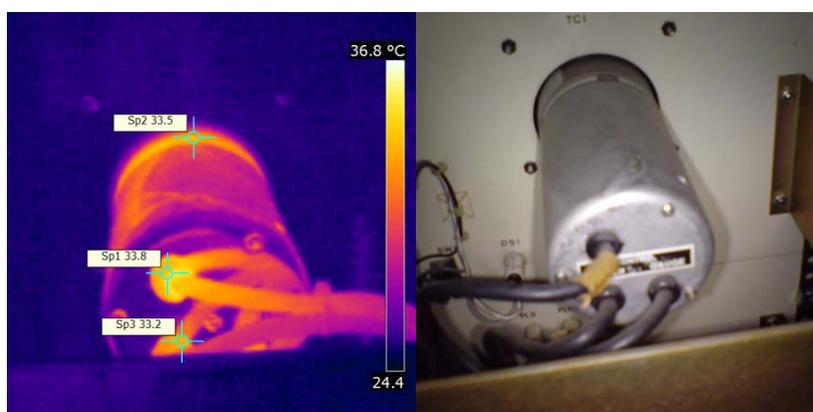
Gambar 9. Disipasi panas pada relay di panel kontrol siklotron

Gambar 10 menunjukkan disipasi panas yang terjadi pada sebuah komponen yang berada di bagian bawah panel dan tersembunyi. Setelah terdeteksi adanya penyebaran panas yang cukup tinggi kemudian diberikan penerangan yang cukup, dan diketahui terdapat sebuah transformator power supply. Suhu tertinggi yang dicapai oleh transformator tersebut adalah 52.1 °C. Nilai tersebut masih berada pada rentang suhu normal operasi.



Gambar 10. Disipasi panas pada sebuah transformator di panel kontrol siklotron

Gambar 11 merupakan disipasi panas yang terjadi pada sebuah meter pada panel kontrol siklotron. Panas maksimal terjadi pada kabel yaitu sebesar 33.8 °C, nilai tersebut berada pada batas standar sehingga dinyatakan normal.

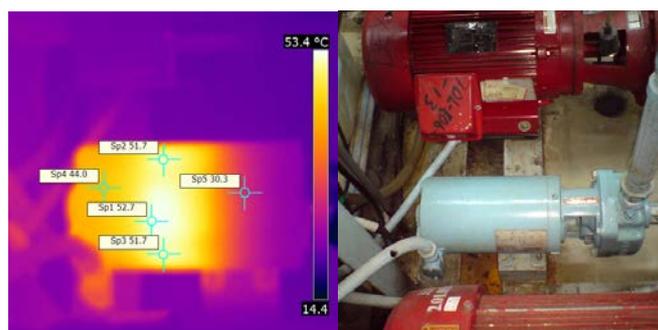


Gambar 11. Komponen meter pada sistem kontrol siklotron

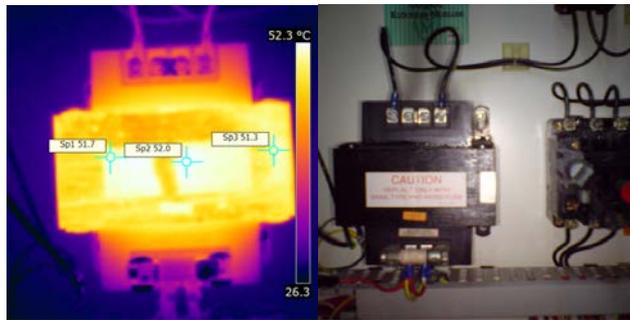
### Analisa thermal pada sistem pendingin siklotron

Sistem pendingin siklotron merupakan sebuah sistem yang melakukan sirkulasi air dingin untuk mengambil panas dari beberapa titik dari sistem siklotron. Dalam sistem pendingin tersebut, komponen yang memungkinkan menimbulkan panas yang cukup tinggi adalah pada motor pompa dan komponen yang terdapat dalam unit kontrolnya. Gambar 12 merupakan disipasi panas yang terjadi pada motor pompa kecil dari sistem pendingin siklotron. Disipasi panas yang ditimbulkan saat motor beroperasi berkisar antara 30 °C sampai dengan 52.7 °C. Nilai tersebut masih berada pada rentang nilai normal. Jika suhu motor melebihi 70 °C maka diperlukan tindakan perawatan disesuaikan dengan tingkat kenaikan suhunya.

Gambar 13 adalah sebaran panas yang terjadi pada transformator yang terdapat pada unit kontrol sistem pendingin siklotron. Suhu maksimalnya adalah 52 °C. Nilai tersebut berada di bawah batas maksimal suhu operasi yaitu 60 °C sehingga dinyatakan normal.

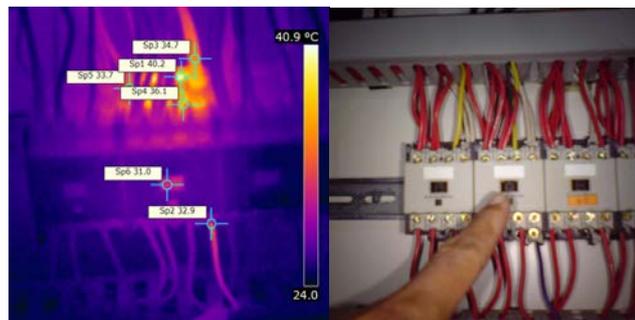


Gambar 12. Motor pompa pendingin siklotron (kecil)



Gambar 13. Transformator pada panel kontrol pendingin siklotron

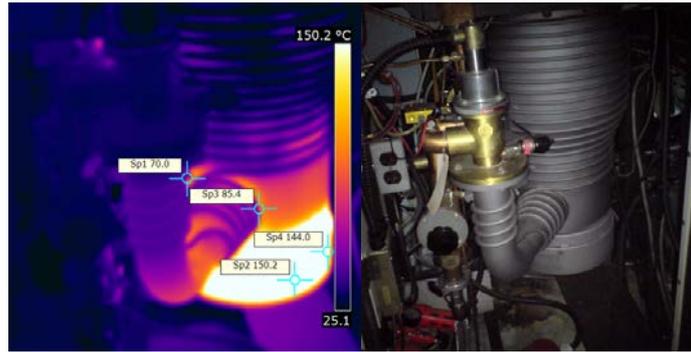
Gambar 14 merupakan disipasi panas yang terjadi pada kontaktor motor pompa air pendingin siklotron yang terdapat pada panel kontrol pompa pendingin. Panas maksimal terjadi pada terminal kabel dengan maksimal suhu sampai dengan 40.2 °C. Nilai tersebut masih berada pada suhu normal dengan mengacu pada suhu maksimal yang diperbolehkan yaitu 75 °C.



Gambar 14. Kontaktor motor pompa pendingin siklotron (kecil)

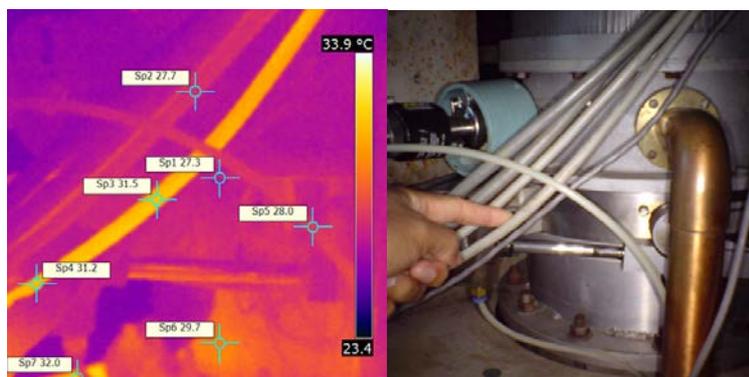
### Analisa thermal pada jaringan listrik di cave siklotron

Di dalam cave siklotron terdapat jaringan listrik yang menyalurkan energi listrik menuju beban-beban yang terdapat di dalam cave siklotron seperti pompa vakum, generator hidrogen, Rangkaian RF dan lain sebagainya. Penulis melakukan inspeksi terhadap semua instalasi listrik di dalam cave siklotron namun hanya menyampaikan beberapa data saja yang dianggap memerlukan perhatian lebih besar. Gambar 15 merupakan disipasi panas yang terjadi pada pompa vakum difusi. Pada bagian bawah terdapat disipasi panas sangat tinggi sampai dengan 150.2 °C. Namun nilai tersebut merupakan nilai normal karena di dalamnya terdapat pemanas (*heater*) yang merupakan bagian dari sistem vakum difusi. Heater tersebut mempunyai kapasitas 4400 watt dengan harapan mampu membangkitkan panas lebih dari 200 °C. Jadi pembacaan temperature sebesar 150.2 °C pada sisi luar merupakan kondisi normal, karena pada body pompa difusi memang melengkapi sistem pendingin. Sehingga panas pada body menjadi lebih rendah dibandingkan dengan temperatur sesungguhnya.



Gambar 15. Disipasi panas pada sistem vakum difusi sikotron

Gambar 16 merupakan inspeksi yang dilakukan terhadap instalasi kabel. Dari beberapa kabel terdapat satu kabel yang memiliki perbedaan suhu dibandingkan kabel yang lainnya. Pada salah satu kabel tersebut suhu maksimal yang terjadi adalah 31.5 °C. Penunjukkan perbedaan suhu terhadap kabel yang lain berada pada kisaran 3-5 °C. Karena perbedaan suhu yang tidak signifikan, kemudian dilakukan penelusuran terhadap kabel yang memiliki panas lebih besar. Ternyata kabel tersebut digunakan untuk memsaok listrik ke alat Generator Hidrogen. Selanjutnya ditemukan suatu kemungkinan penyebabnya; terdapat 2 jenis kabel yaitu kabel standar yang sudah terpasang pada Generator Hidrogen sampai pada sebuah terminal. Kemudian terdapat kabel dengan diameter lebih kecil yang terhubung dari terminal menuju panel listrik. Kabel kecil inilah yang memiliki nilai suhu yang lebih tinggi dari beberapa kabel yang ada di jaringan listrik tersebut. Berdasarkan analisa tersebut maka direkomendasikan untuk melakukan penggantian terhadap kabel dengan diameter lebih kecil menggunakan kabel standar sesuai dengan kapasitas Generator Hidrogen.



Gambar 16. Disipasi panas pada kabel power hidrogen generator

Berdasarkan data dan pembahasan tersebut maka dapat dibuat rekapitulasinya seperti terlihat pada Tabel 4. Dari Tabel 4 dapat dilihat bahwa terdapat 3 peralatan atau komponen yang mengalami anomali yaitu Trafo Utama Panel Penstabil, Trafo Phase dan Kabel Power Hidrogen Generator. Trafo Utama Panel Penstabil memiliki rekomendasi untuk dilakukan perawatan segera karena termasuk dalam kategori tinggi dengan perbedaan suhu sampai dengan 37.8 °C dari suhu operasi maksimal. Trafo phase berada dalam kategori rendah dengan perbedaan suhu 6.6 °C dan diberikan rekomendasi pemeriksaan rutin secara berkala. Sementara itu kabel power untuk pasokan listrik ke hidrogen generator direkomendasikan untuk digganti, karena tidak sesuai dengan kapasitas mesin hidrogen generator. Kabel tersebut minimal sama dengan kabel power yang terpasang pada mesin hidrogen generator (eksisting).

Tabel 4. Rekapitulasi hasil inspeksi terhadap jaringan listrik siklotron

No	Jenis Peralatan/komponen	Temperatur inspeksi Maksimal (°C)	Temperatur operasi Maksimal (°C)	Kategori	Rekomendasi
1	Meter Voltage Panel utama siklotron	39.2	50	Normal	Monitoring rutin
2	Pembatas arus	29.8	50	Normal	Monitoring rutin
3	COS panel penstabil	49.6	75	Normal	Monitoring rutin
4	Trafo Utama Panel Penstabil	97.8	60	Tinggi	memerlukan perawatan sesegera mungkin
5	Trafo phase	66.6	60	Rendah	Memerlukan pemeriksaan awal
6	Relay pada panel kontrol siklotron	34.4 dan 48.4	50	Normal	Monitoring rutin
7	Trafo power supply pada panel kontrol siklotron	52.1	60	Normal	Monitoring rutin
8	Komponen meter pada panel kontrol siklotron	33.8	50	Normal	Monitoring rutin
9	Motor pompa pendingin siklotron (kecil)	52.7	70	Normal	Monitoring rutin
10	Transformator pada panel kontrol pendingin siklotron	52	60	Normal	Monitoring rutin
11	Kontaktor motor pompa pendingin siklotron (kecil)	40.2	75	Normal	Monitoring rutin
12	Sistem vakum difusi siklotron	150.2	>200	Normal	Monitoring rutin
13	Kabel power hidrogen generator	31.5	50	Spesifikasi kabel tidak sesuai	Penggantian kabel

## KESIMPULAN

Inspeksi menggunakan thermography infra merah dapat memberikan informasi awal yang cukup akurat untuk mengetahui titik terjadinya anomali. Bahkan dengan teknik tersebut gejala awal dapat diketahui lebih dini sehingga tindakan antisipasi dapat dilakukan agar tidak terjadi kegagalan ataupun kecelakaan. Beberapa data hasil inspeksi menunjukkan kecenderungan suhu mendekati batas maksimal suhu operasi bahkan ada peralatan yang berada pada kategori tinggi dilihat dari tingkat kenaikan suhu yang terjadi. Rekomendasi telah diberikan untuk sesuai kategorinya. Kategori tinggi terjadi pada transformator utama pada panel penstabil tegangan, dengan rekomendasi yang diberikan adalah dilakukannya perawatan sesegera mungkin.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih penulis sampaikan kepada teman-teman yang telah membantu dalam penyelesaian tulisan ini, terutama teman-teman yang berada di Sub bidang Pengelolaan Fasilitas Aktivasi yang telah membantu dalam proses inspeksi terhadap jaringan listrik siklotron. Ucapan terimakasih juga penulis ucapkan kepada Bapak Aceu Turyana selaku Kepala Bidang Pengelolaan Fasilitas Proses Radioisotop yang telah memberikan semangat dan dukungannya sehingga kegiatan ini terlaksana dengan lancar.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Kosa Shantia, dkk, Analisis Pemanfaatan Energi Listrik pada Mesin-mesin Produksi Divisi Pabrikasi Di PT INKA Madiun, <https://media.neliti.com/media/publications/117553-ID-analisis-pemanfaatan-energi-listrik-pada.pdf> diakses bulan Juni 2018
2. Marsha Fitrantie dan Wahyu Wibowo, Pemodelan Konsumsi Energi Listrik Pada Sektor Industri di Provinsi Jawa Timur Menggunakan Metode Regresi Data Panel, JURNAL SAINS DAN SENI ITS Vol. 5 No. 2 (2016)

3. Muhamad Rifqi dan Karnoto, Operasi Dan Pemeliharaan Jaringan Distribusi Tegangan Menengah 20 KV, Makalah Seminar Kerja Praktek, Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro, Agustus 2010
4. Bijah Subijanto, Pemanfaatan Energi Nuklir Untuk Pembangkit Listrik Tinjauan dari Perspektif Intelijen, Prosiding Seminar Teknologi Pengamanan Bahan Nuklir ke-5 ISSN: 1412-2812 Jakarta, 29 September 2004
5. Ari Satmoko, Abdul Hafid, Pemeliharaan Prediktif Pada Jaringan Listrik Dengan Thermography Infra Merah, Seminar Nasional III SDM Teknologi Nuklir Yogyakarta, 21-22 November 2007, ISSN 1978-0176
6. H. Alief Maulana, dkk, Analisa Kondisi Generator Transformer Menggunakan Metode *Thermography*, The 3rd National Conference on Industrial Electrical and Electronics (NCIEE) Proceedings, ISBN: 978-602-98211-0-9
7. Teguh Sulisty, dkk, Diagnosis Penuaan Komponen Panel Busbar Utama II Sistem Kelistrikan RSG-GAS dengan Menggunakan Infrared Thermography, Prosiding PPI - PDIPTN 2007 Pustek Akselerator dan Proses Bahan - BATAN Yogyakarta, 10 Juli 2007
8. Adhi Kusmantoro, Sri Sukamta, Pemeriksaan Kondisi Peralatan Mekanikal dan Elektrikal Gedung Menggunakan Metode Infrared Thermography, Jurnal Teknik Elektro Vol. 5 No. 1 Januari - Juni 2013
9. I Wayan Widiana, dkk, Aplikasi *Thermography* Infra Merah Dalam Pemeliharaan Prediktif Motor Exhaust Fan, Prosiding Seminar Penelitian Dan Pengelolaan Perangkat Nuklir, Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan Yogyakarta, 11 September 2013

## TINJAUAN MATERIAL ACCOUNTED FOR (MUF) PADA DESAIN RDE

Pertiwi D. W., S.T.<sup>1</sup>, Bening F., S.ST.<sup>1</sup>, Hendro W., A.Md.<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> PTBBN, Gd. 20 Kawasan Nuklir Serpong, Tangerang Selatan, 15314  
email: [pertiwidw@batan.go.id](mailto:pertiwidw@batan.go.id)

### ABSTRAK

**TINJAUAN MATERIAL ACCOUNTED FOR (MUF) PADA DESAIN RDE.** Reaktor Daya Eksperimental (RDE) ditetapkan sebagai fasilitas *bulk* karena bahan bakar nuklir RDE berbentuk *pebble*/bola pejal dan berjumlah sangat banyak mencapai puluhan ribu. Bahan bakar nuklir bentuk *Pebble* tidak memiliki identitas *item* seperti nomor seri di setiap bola sehingga sulit untuk dilakukan verifikasi terhadap setiap *item* elemen bakar (*item handling facility*). Pembukuan bahan nuklir pada fasilitas *bulk* seharusnya mempunyai perbedaan pada pembukuan inventori dan pembukuan fisik yang menyebabkan adanya *Material Accounted For* (MUF). Meskipun RDE merupakan fasilitas *bulk*, namun bahan nuklir pada fasilitas ini berbentuk *pebble* sehingga terjadinya MUF dari sisa-sisa pada fuel handling tidak mungkin terjadi. Hal tersebut yang membuat penulis perlu meninjau kemungkinan terjadinya MUF pada *Conceptual Design* RDE. Tujuan peninjauan MUF pada *fuel handling* adalah untuk memastikan bahwa MUF pada fasilitas RDE tidak mungkin terjadi. Peninjauan MUF dilakukan pada *Conceptual Design* RDE dan Dokumen Sistem Seifgard RDE BATAN dan selanjutnya dilakukan analisis terhadap kemungkinan terjadinya MUF di setiap KMP (*Key Measurement Point*). Dari hasil tinjauan dapat diketahui bahwa tidak terdapat bahan nuklir yang tertinggal selama proses (*nature of processing*) pada *fuel handling*. Hal ini membuktikan bahwa kemungkinan MUF pada bahan nuklir berbentuk bola pejal (*pebble*) selama proses tidak mungkin terjadi. Kemungkinan MUF terjadi karena adanya perbedaan/deviasi pengukuran yang mengakibatkan buku besar pada laporan seifgard menjadi tidak *balance*. Peninjauan MUF merupakan hal yang sangat penting pada fasilitas *bulk*. Dengan melakukan peninjauan ini diharapkan dapat dilakukan pencegahan terhadap penyalahgunaan bahan nuklir di fasilitas RDE.

Kata kunci: RDE, MUF, seifgard, fasilitas *bulk*, *pebble*

### ABSTRACT

**MATERIAL ACCOUNTED FOR (MUF) REVIEW FOR RDE DESIGN.** Experimental Power Reactor (Reaktor Daya Eksperimental, RDE) has been declared as a bulk facility because RDE fuel is pebble fuel/solid ball and there are thousands fuels in the core. Pebble fuels do not have an item identity like serial number on every ball, so it is difficult to verify each fuel element item (*item handling facility*). Nuclear material accounting in bulk facility should have a difference in inventory book and physical inventory which led to the existence of *Material Accounted For* (MUF). Eventhough RDE has been declared as a bulk facility, pebble causes MUF from the remnants of the fuel handling may not occur. Therefore we need to review the existence of MUF in *Conceptual Design* RDE. The aim of this review is to ensure MUF in RDE may not occur. This review was conducted for *Conceptual Design* RDE and *Safeguards System Document* and hereafter analyzed the possibility of MUF in each KMP (*Key Measurement Point*). After the review, we can know that there is no nuclear material left behind during the process (*nature of processing*) in fuel handling. This proves the possibility of MUF in pebble facility during the process is not possible. The possibility of MUF will be occurred because of difference/deviation in measurement that effect general ledger unbalancing. MUF review is important in bulk facility to prevent an indication of unauthorized activities in RDE.

Keyword: RDE, MUF, safeguards, bulk facilities, pebble

### PENDAHULUAN

Perkembangbiakan senjata nuklir di dunia dimulai oleh USA pada tahun 1945 dengan melakukan percobaan *trinity test* di New Mexico. Negara-negara lainya seperti Rusia, Inggris, Perancis, dan China juga ikut serta dalam sejarah perkembangbiakan senjata nuklir dunia[1]. Usaha untuk mengendalikan perkembangbiakan senjata nuklir pertama-tama diusulkan sendiri oleh Amerika pada 1946 ketika pemerintah Amerika menyerahkan *The*

*Baruch Plan* ke Komisi Tenaga Atom, Perserikatan Bangsa Bangsa (PBB)[2]. Oleh karena itu, dibentuk IAEA (*International Atomic Energy Agency*) yang memulai kegiatannya di Wina, Austria pada Juli 1957. IAEA mempunyai misi untuk membantu pengembangan energi nuklir untuk maksud damai, menyediakan jaminan bahwa fasilitas dan bahan nuklir yang dideklarasikan ke IAEA tidak diselewengkan untuk pembuatan senjata nuklir. Pada April 1971 dilalukan perjanjian seifgard bahan nuklir antara suatu negara dengan IAEA yang ditetapkan dalam dokumen INFCIRC/153. Pelaksanaan perjanjian *Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons* (NPT) menandai langkah pembaharuan atas kebijaksanaan berkaitan dengan perkembangbiakan senjata nuklir dan pemberhentian perkembangbiakan senjata nuklir. Indonesia sebagai *Non-Nuclear Weapon State* (NNWS) yang ikut menandatangani perjanjian tersebut wajib mengimplementasikan sistem seifgard terhadap fasilitas nuklirnya.

Reaktor Daya Eksperimental (RDE) merupakan tipe *High Temperature Gas Reactor* (HTGR) yang sedang dikembangkan oleh BATAN. HTGR sebagai reaktor nuklir generasi ke IV mempunyai tingkat keselamatan yang tinggi sehingga dipilih sebagai teknologi energi nuklir yang akan dikembangkan oleh BATAN.

Fasilitas RDE sebagai instalasi nuklir wajib memberlakukan sistem seifgard untuk memenuhi syarat regulasi nasional yang berlaku (PP nomor 2 tahun 2014 tentang perizinan instalasi nuklir dan pemanfaatan bahan nuklir) dan memberikan jaminan bahwa bahan nuklir yang dimanfaatkan hanya untuk tujuan damai. Oleh karena itu, diperlukan kajian/tinjauan mengenai sistem seifgard atau *Nuclear Material Accounting Control* (NMAC) yang berlaku untuk RDE. Salah satu kajian yang dibahas dalam tulisan adalah mengenai *Material Unaccounted For* (MUF) atau bahan nuklir yang tidak dapat dipertanggung jawabkan.

Evaluasi jumlah MUF merupakan hal yang penting untuk mengetahui kemungkinan terjadinya pengurangan bahan nuklir karena tindakan ilegal pada fasilitas *bulk*. Jumlah MUF yang berlebihan mengindikasikan adanya pengurangan bahan nuklir karena tindakan ilegal yang harus dilakukan investigasi dan penanganan lebih lanjut[3]. Pada fasilitas *bulk*, jumlah MUF seharusnya tidak sama dengan nol karena adanya ketidakpastian pengukuran dan kejadian yang terkait selama proses[4].

RDE ditetapkan sebagai fasilitas *bulk* karena setiap *pebble fuel* di reaktor berjumlah sangat banyak mencapai puluhan ribu dan tidak memiliki identitas *item* seperti nomor seri di setiap bola sehingga tidak memungkinkan untuk melakukan verifikasi terhadap setiap item elemen bakar (*item handling facility*)[5]. Meskipun RDE merupakan fasilitas *bulk*, tetapi bahan nuklir pada fasilitas ini berbentuk *pebble*/bola pejal (tidak seperti bentuk bahan nuklir pada fasilitas *bulk* lainnya) sehingga kemungkinan adanya MUF dari sisa sisa di *fuel handling* adalah tidak mungkin. Hal tersebut yang membuat penulis perlu meninjau kemungkinan terjadinya MUF pada *conceptual design* RDE.

Peninjauan MUF dilakukan pada *fuel handling unit* pada desain RDE dan Dokumen Sistem Seifgard RDE BATAN dan kemudian melakukan analisis kemungkinan adanya MUF di setiap KMP (*Key Measurement Point*). Tujuan penulisan adalah memberikan gambaran kemungkinan terjadinya MUF pada fasilitas RDE. Informasi mengenai MUF pada tulisan ini diharapkan dapat menjadi pertimbangan pada kegiatan RDE lainnya yang berkaitan dengan *safeguards*.

## TEORI

Reaktor Daya Eksperimental (RDE) merupakan reaktor nuklir generasi ke IV yang sedang dikembangkan oleh BATAN. Tipe reaktor yang digunakan adalah tipe *High Temperature Gas Reactor* (HTGR) dengan daya 10 MWth. Bahan bakar nuklir yang digunakan merupakan bahan bakar triso dengan bentuk *pebble* (bola-bola pejal). Bahan bakar dialirkan ke dalam teras reaktor satu-persatu secara *continuous* hingga mencapai *burnup* tertentu. Bahan bakar yang telah keluar teras reaktor tetapi belum mencapai batas *burnup*, akan diumpun ulang ke dalam teras reaktor. Sedangkan bahan bakar yang telah mencapai batas *burnup* akan dikirim ke tempat penyimpanan bahan bakar bekas.

Fasilitas nuklir terdiri dari 2 tipe, yaitu fasilitas *item* dan fasilitas *bulk*. Fasilitas *item* adalah fasilitas dimana bahan nuklir pada fasilitas tersebut dijaga/disimpan dalam bentuk *item* atau satuan dan integritas dalam *item* tetap tidak berubah selama berada di fasilitas tersebut. Fasilitas lainnya adalah fasilitas *bulk* atau curah dimana bahan nuklir dimanfaatkan atau disimpan dalam bentuk *bulk*. Setiap fasilitas nuklir mempunyai *Material Balance Area* (MBA), yaitu area (di dalam atau di luar fasilitas) di mana jumlah bahan nuklir pada setiap

transaksi (transaksi masuk ataupun transaksi keluar) dapat ditentukan. Sebuah MBA harus memiliki titik pengukuran bahan nuklir atau *Key Measurement Point* (KMP) yang terdiri KMP alir dan KMP inventori. KMP alir merupakan titik untuk menentukan aliran bahan nuklir di dalam MBA, dan KMP inventori adalah tempat untuk pemanfaatan bahan nuklir[6].

Setiap MBA wajib untuk membuat pembukuan bahan nuklir untuk memastikan keefektifan dari sebuah sistem seifgard di fasilitas nuklir. Aktifitas pembukuan bahan nuklir mencakup pengukuran, analisis, pencatatan dan laporan untuk menjaga jumlah bahan nuklir yang ada dalam sebuah area tertentu di fasilitas. Verifikasi neraca bahan nuklir dilakukan melalui inventori fisik bahan yang ada dalam fasilitas. Salah satu komponen yang digunakan dalam laporan neraca bahan nuklir yaitu MUF.

MUF (*Material Unaccounted For*) merupakan perbedaan antara inventori buku dan inventori fisik. Pada fasilitas *item* secara teori tidak terdapat MUF ( $MUF=0$ ), jika ditemukan  $MUF \neq 0$  maka terdapat indikasi terjadinya kesalahan (misalkan kesalahan pembukuan) yang harus diperiksa lebih lanjut. Jumlah MUF pada fasilitas *bulk* seharusnya  $\neq 0$  karena adanya ketidakpastian perhitungan dan hilang dalam proses[7]. MUF berasal dari :

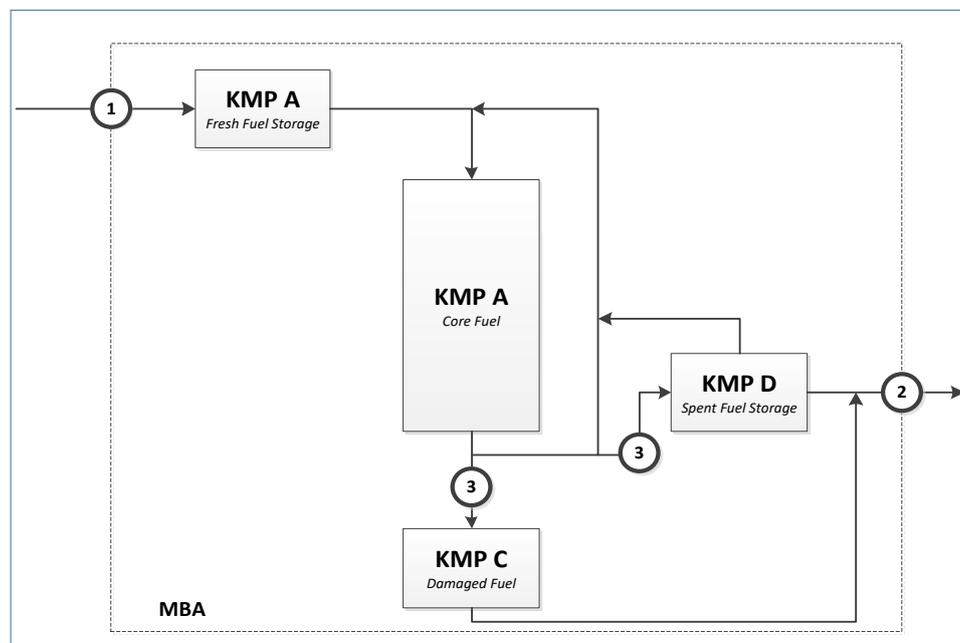
1. Jumlah bahan nuklir dalam inventori yang tidak terukur.
2. Jumlah bahan nuklir yang tidak terhitung karena kesalahan dalam pencatatan/ atau kesalahan pengolahan memproses data[8].

### METODOLOGI

Metode kegiatan dilakukan dengan peninjauan proses *fuel handling pada Conceptual Design RDE* dan peralatan dan teknik penentuan inventori bahan nuklir pada dokumen teknis sistem seifgard RDE.

Bentuk MBA yang terdapat pada *Conceptual Design RDE* berdasarkan dokumen sistem seifgard RDE terdiri dari 4 KMP alir dan 4 KMP inventori. KMP alir yang ditandai dengan angka digunakan untuk pengukuran jumlah bahan nuklir yang masuk ke dalam atau ke luar dari MBA yang terdiri dari:

- KMP 1 : Penerimaan dari MBA lain (bahan bakar nuklir segar)
- KMP 2 : Pengiriman ke MBA lain (bahan bakar nuklir bekas/*spent fuel* dan bahan bakar nuklir rusak/*damage fuel*)
- KMP 3 : pemindahan bahan bakar nuklir bekas dari teras reaktor ke tempat penyimpanan bahan bakar nuklir bekas
- KMP 4 : pemindahan bahan bakar nuklir bekas dari teras reaktor ke tempat penyimpanan bahan bakar nuklir rusak



Gambar 1. Struktur MBA pada Desain RDE

KMP inventori digunakan untuk pengukuran jumlah bahan nuklir pada daerah tersebut dan terdiri dari:

- KMP A : Tempat penyimpanan elemen bahan nuklir baru

- KMP B : Teras reaktor (*fuel in core reactor*)  
KMP C : Tempat penyimpanan bahan nuklir yang rusak  
KMP D : Tempat penyimpanan bahan nuklir bekas yang juga berfungsi sebagai tempat penyimpanan *used fuel (core emptying and reloading)*

Peninjauan *fuel handling* pada setiap KMP dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. KMP A  
KMP A terdiri dari tempat penyimpanan bahan bakar nuklir segar dan jalur bahan bakar menuju ke teras reaktor termasuk *fuel inspection line*. Pengukuran bahan nuklir pada tempat penyimpanan bahan bakar nuklir segar dilakukan dengan mengukur *cash* (setiap batch) menggunakan metode *Non Destructive Analysis* (NDA) secara acak dengan probabilitas untuk memastikan keberadaan bahan nuklir. Bahan nuklir segar yang mengalir menuju teras reaktor diukur dengan *flow monitor counter* dan alat pengukur NDA. *Flow monitor counter* berfungsi untuk menghitung/memantau jumlah bahan nuklir segar yang masuk ke teras reaktor. Kandungan bahan nuklir pada bahan bakar segar tersebut diukur menggunakan alat ukur NDA.
2. KMP B (teras reaktor)  
KMP terdiri dari pertemuan jalur bahan bakar nuklir segar, *used fuel*, dan *irradiated fuel* yang menuju teras reaktor, jalur masuk teras reaktor, teras reaktor, dan jalur keluar teras reaktor. Bahan nuklir yang pada jalur bahan bakar nuklir segar, *used fuel*, dan *irradiated fuel* yang menuju teras reaktor hingga jalur masuk teras reaktor tidak dilakukan pengukuran (pengukuran telah dilakukan pada jalur-jalur sebelumnya). Pengukuran bahan nuklir tidak dilakukan dalam teras reaktor, sehingga verifikasi hanya dilakukan dengan melakukan pengawasan menggunakan perangkat *containment and surveillance* (C/S). Jalur teras reaktor dibagi menjadi dua yaitu:
  - a. Jalur pemisahan bahan bakar rusak/*damage fuel*. Bahan bakar teriradiasi yang keluar dari teras reaktor akan melalui *failed fuel separator*. Bahan bakar yang lolos akan menuju ke KMP C yaitu tempat penyimpanan bahan nuklir yang rusak. Bahan bakar yang tidak lolos akan diteruskan menuju jalur berikutnya.
  - b. Jalur pemisahan *spent fuel*. Bahan bakar nuklir teriradiasi yang tidak lolos *failed fuel separator* akan diteruskan untuk melakukan perhitungan *item* menggunakan *flow monitor counter*. Selanjutnya mengukur *burnup* bahan bakar nuklir teriradiasi dengan pengukuran radioaktivitas Cs-137 sebagai indikator dari hasil belah U-235. Bahan bakar nuklir yang mempunyai nilai *burnup* kurang dari nilai *burnup* maksimum yang dipersyaratkan dalam reaktor akan dikembalikan ke dalam reaktor melalui jalur kembali menuju teras reaktor. Bahan bakar nuklir teriradiasi yang dikembalikan ke dalam teras reaktor akan dipantau jumlahnya menggunakan *flow monitor counter*. Sedangkan bahan bakar nuklir yang mempunyai nilai *burnup* lebih besar dari nilai *burnup* maksimum yang dipersyaratkan dalam reaktor akan dialirkan menuju ke tempat bahan bakar nuklir bekas.
3. KMP C  
KMP C merupakan tempat penyimpanan bahan nuklir yang rusak (*damage fuel*). Bahan bakar yang lolos dipantau/dihitung jumlahnya menggunakan *flow monitor counter* sebelum masuk ke tempat penyimpanan bahan nuklir yang rusak. Di dalam tempat penyimpanan bahan nuklir yang rusak, dilakukan pengukuran *damage fuel* menggunakan metode NDA.
4. KMP D  
KMP D terdiri dari tempat penyimpanan bahan bakar nuklir bekas dan tempat penyimpanan *used fuel (core emptying and reloading)*.
  - a. Bahan bakar nuklir yang mempunyai nilai *burnup* lebih besar dari nilai *burnup* maksimum yang dipersyaratkan dalam reaktor akan dialirkan menuju ke tempat bahan bakar nuklir bekas. Sebelum masuk ke dalam wadah akan di dipantau/dihitung jumlahnya menggunakan *flow monitor counter*. *Spent fuel* kemudian akan dihitung kandungan Plutonium (Pu) dan U-235 menggunakan alat *spectrometer gamma* serta pemantauan suhu.
  - b. Tempat penyimpanan *used fuel* digunakan pada saat reaktor mengalami *maintenance*. Perhitungan bahan bakar nuklir teriradiasi menggunakan *flow monitor counter* untuk menghitung *item* dari maupun saat kembali ke teras reaktor.x

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Siklus bahan nuklir dimulai dari KMP A ketika bahan nuklir masuk ke dalam fasilitas RDE. Informasi mengenai bahan nuklir yang diterima terdapat di dalam dokumen yang dilampirkan, sehingga tidak perlu dilakukan pengukuran pada saat penerimaan. Pengukuran terhadap bahan nuklir yang ditampung di dalam kontainer dilakukan secara acak pada saat inspeksi internal dengan menggunakan metode NDA. Jika terdapat ketidaksesuaian berat bahan nuklir dari hasil pengukuran dengan dokumen, maka perbedaan tersebut dimasukkan ke dalam *Shipper-Receiver Different* (SRD). Ketidaksesuaian data bahan nuklir yang masuk ke KMP A tersebut tidak termasuk MUF.

Bahan nuklir yang digunakan di teras reaktor (KMP B) tidak mungkin dilakukan pengukuran secara langsung. Verifikasi bahan nuklir dilakukan dengan pengawasan melalui perangkat C/S, sementara perhitungan bahan nuklir yang hilang dan dihasilkan selama reaksi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak tertentu. Hasil perhitungan bahan nuklir tersebut menjadi dasar perhitungan pembukuan inventori.

Pengukuran bahan bakar nuklir rusak (*damage fuel*) teriradiasi di KMP C dilakukan dengan analisis kandungan bahan nuklir menggunakan metode NDA. Hasil pengukuran jumlah bahan nuklir di KMP C memungkinkan terdapat perbedaan antara pembukuan fisik hasil pengukuran dengan pembukuan inventori sehingga terjadi MUF. Namun jika dilihat dari sifat fisik *pebble* yang terbuat dari bahan yang sangat kuat untuk mengungkung bahan nuklir dari kerusakan, maka MUF tidak mungkin terjadi di KMP C.

Tempat penyimpanan bahan bakar nuklir bekas dan tempat penyimpanan *used fuel* (*core emptying and reloading*) terdapat di KMP D. Pengukuran bahan nuklir di tempat penyimpanan *used fuel* dilakukan secara *item counting*, sehingga bahan nuklir yang tertinggal karena proses dianggap tidak ada. Sementara di tempat penyimpanan bahan nuklir bekas pengukuran dilakukan dengan metode NDA. Dari hasil pengukuran bahan bakar nuklir bekas tersebut memungkinkan terjadinya perbedaan jumlah pada pembukuan MBA, sehingga dapat ditemukan MUF.

## KESIMPULAN

Fasilitas *bulk* RDE merupakan fasilitas nuklir yang unik. Pemantauan jumlah bahan bakar nuklir dilakukan secara *counting item* menggunakan *flow counter meter* namun tidak dilakukan secara penimbangan berat. *Counting item* dilakukan karena bahan bakar berbentuk *pebble fuel* dan integritas dalam *item* tetap dan tidak berubah. Di sisi lain, *pebble fuel* di reaktor berjumlah sangat banyak mencapai puluhan ribu dan tidak memiliki identitas *item* seperti nomor seri di setiap bola sehingga tidak memungkinkan untuk menggunakan *counting item* sebagai dasar perhitungan dan pengukuran bahan nuklir. Oleh karena itu, digunakan metode NDA untuk mengetahui jumlah bahan nuklir pada setiap titik pengukuran.

MUF pada RDE dihasilkan karena adanya inventori yang disebabkan oleh deviasi pengukuran. MUF yang diakibatkan karena adanya bahan nuklir yang tertinggal karena proses (*nature of processing*) tidak terjadi karena bahan bakar nuklir *pebble* dianggap tidak akan tertinggal pada *fuel handling*.

Kegiatan selanjutnya yang perlu dilakukan adalah perhitungan/penentuan batas maksimum dan minimum MUF yang diperbolehkan. Semakin kecil standar deviasi pengukuran, maka semakin kecil juga MUF yang dapat dimanfaatkan untuk pengambilan bahan nuklir secara ilegal. Tetapi dengan semakin kecil standar deviasi pengukuran, maka peralatan pengukuran dan perhitungan juga harus semakin akurat (menambah biaya instalasi).

Peninjauan dan perhitungan MUF merupakan hal yang sangat penting pada fasilitas *bulk*. Dengan melakukan peninjauan ini, diharapkan dapat dilakukan pencegahan terhadap penyalahgunaan bahan nuklir di RDE.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan syukur Alhamdulillah kepada Allah SWT atas limpahan karunia sehingga penulis dapat menyelesaikan Karya Tulis Ilmiah ini. Pada kesempatan kali ini penulis juga menyampaikan terimakasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya kepada seluruh anggota Tim Program Insinas WP 8.2-Pengembangan Desain Seifgard RDE dan Bagian Tata Usaha PTBBN yang telah membantu baik dalam bentuk fasilitas, dana maupun peralatan bagi keberhasilan dan kelancaran penulisan Karya Tulis Ilmiah. Semoga pengorbanan dan segala sesuatunya yang dengan tulus dan ikhlas akan selalu mendapat limpahan rahmat Allah SWT dan bermanfaat bagi orang lain.

**DAFTAR PUSTAKA**

1. Kusbandono, "NPT dan Perkembangannya", Serpong (2018).
2. Pusdiklat BATAN, "NPT dan Perkembangannya", Diktat Pelatihan Pelatihan Penyebaran Pengurus Inventori Bahan Nuklir, Serpong (2018).
3. SNSTC, "*Physical Inventory Taking*", RTC of NMAC, Beijing (2018).
- 4.6.7. IAEA, "*Safeguards Glossary 2001 Edition*", *International Nuclear Verification Series* No. 3, Wina (2001).
5. BATAN, "Dokumen Sistem Seifgards RDE", Serpong (2016).
8. BAPETEN, "Prosedur Evaluasi Bahan Nuklir yang Tidak Dapat Dipertanggung Jawabkan (*Material Unaccounted For/MUF*)", Jakarta.

## KAJIAN PEMANFAATAN HTGR SEBAGAI CAPTIVE POWER DI KAWASAN INDUSTRI

Rr. Arum Puni Rijanti<sup>1</sup>, Sahala Maruli Lumbanraja<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Pusat Kajian Sistem Energi Nuklir

Badan Tenaga Nuklir Nasional

JL. Kuningan Barat, Mampang Prapatan Jakarta 12710

email: [apunir@batan.go.id](mailto:apunir@batan.go.id)

### ABSTRAK

#### KAJIAN PEMANFAATAN HTGR SEBAGAI CAPTIVE POWER DI KAWASAN INDUSTRI.

Private power utility (PPU) atau lebih dikenal pembangkit listrik swasta terintegrasi merupakan salah satu solusi alternatif untuk percepatan program 35.000 MW yang digulirkan pemerintah. Dengan dukungan PPU, pemerintah dan PT Perusahaan Listrik Negara (Persero) dapat memperoleh tambahan dan kualitas pasokan listrik untuk kawasan industri guna menarik investor berkelas internasional. Di Indonesia, private power utility /Captive Power (perusahaan listrik swasta) mulai berkembang seiring perkembangan pesat kawasan industri. Terdapat sedikitnya lima private power utility di Indonesia, tiga private power utility di antaranya PT Bekasi Power, PT Cikarang Listrindo Tbk, dan PT Kariangau Power. Tujuan penulisan ini adalah untuk mengkaji pemanfaatan HTGR sebagai captive power untuk Kawasan industri. Metode penulisan ini menggunakan studi literatur yang diperoleh dari jurnal serta laporan penelitian lainnya. Keberadaan perusahaan listrik swasta skala kecil ini sangat penting untuk keberhasilan suatu kawasan industri, terutama industri strategis. Pembangkit Captive Power adalah bentuk dari pembangkit terdistribusi, menghasilkan energi yang dekat dengan sumber penggunaan. Pembangkit terdistribusi memfasilitasi efisiensi bahan bakar yang tinggi serta meminimalkan kerugian yang terkait dengan transmisi listrik dari pembangkit listrik terpusat. Manfaat pembangkit captive power antara lain keamanan pasokan listrik melalui pembangkit sendiri, mengurangi biaya bahan bakar, peningkatan kehandalan sistem kelistrikan setempat karena adanya pembangkit di dekat pusat beban, dan juga mengurangi beban jaringan utama serta penyusutan (losses) di transmisi listrik dan peningkatan kinerja lingkungan yang dihasilkan oleh efisiensi bahan bakar. HTGR mempunyai kelebihan yaitu dapat digunakan sebagai sumber energi listrik dan/atau pemanfaatan panas industri karena panas keluarannya mencapai lebih dari 700°C juga merupakan energi bersih. Kekurangannya adalah vendor sangat terbatas dan belum ada yang komersial.

**Kata kunci:** HTGR, Captive Power, Kawasan Industri

### ABSTRACT

#### ASSESSMENT OF HTGR UTILIZATION AS A CAPTIVE POWER IN INDUSTRIAL AREAS.

Private power utility (PPU) or better known as an integrated private power plant is one of the alternative solutions to accelerate the 35,000 MW program initiated by the government. With the support of PPU, the government and PT Perusahaan Listrik Negara (Persero) can obtain additional and quality electricity supply for industrial estates to attract international class investors. In Indonesia, private power utility / Captive Power (private power company) began to develop along with the rapid development of industrial estates. There are at least five private power utilities in Indonesia, three private power utilities including PT Bekasi Power, PT Cikarang Listrindo Tbk, and PT Kariangau Power. The purpose of this paper is to examine the use of HTGR as a captive power for industrial estates. This writing method uses literature studies from journals and other research reports. The existence of this small-scale private electricity company is very important for the success of an industrial area, especially a strategic industry. Captive Power is a form of distributed power generation, producing energy close to the source of use. Distributed generators facilitate high fuel efficiency while minimizing losses associated with electricity transmission from centralized power plants. The benefits of captive power pembangkit include security of electricity supply through its own power plant, reducing fuel costs, improving the reliability of the local electrical system due to the power plant near the load center, and also reducing the main grid load and losses in electricity transmission and improving environmental performance. produced by fuel efficiency. HTGR has the advantage

that it can be used as a source of electrical energy and / or industrial heat utilization because the heat output reaches more than 7000C is also clean energy. The drawback is that the vendor is very limited and there is no commercial.

**Keywords:** HTGR, Captive Power, Industrial Estate

## PENDAHULUAN

"Indonesia sebagai sebuah negara industri yang kuat" adalah tujuan dari Rencana Industri Pembangunan Industri Nasional (RIPIN) 2015 – 2035. Arah kebijakan utama yang mendukung tujuan ini adalah pembangunan Kawasan Industri dan Kawasan Ekonomi Khusus, serta pembangunan industri secara keseluruhan. RIPIN menargetkan untuk menambah jumlah perusahaan industri besar dan menengah hingga 9.000 dan separuhnya terletak di luar Jawa serta 20.000 perusahaan industri kecil.[1].

*Captive Power*, atau Pembangkit Terintegrasi (PPUs), atau tenaga listrik yang dihasilkan oleh pemilik lahan untuk digunakan sendiri/digunakan oleh perusahaan lain, mengurangi muatan terhadap jaringan listrik. *Captive power* dapat meningkatkan keandalan, mengurangi biaya usaha, dan dapat dengan cepat menyalurkan tenaga listrik ke wilayah yang kekurangan. Dengan demikian, *captive power* bermanfaat terhadap produktivitas penyewa di Kawasan Industri, khususnya di wilayah dengan koneksi jaringan listrik yang rendah. *Captive Power* tidak saja bermanfaat bagi penyewa dan pengembang Kawasan Industri, namun juga Indonesia secara keseluruhan hal ini dikarenakan Kawasan Industri akan menjadi mesin yang akan menggerakkan investasi dan aktivitas ekonomi di Indonesia.[1]

Kawasan Industri memberikan titik fokus untuk investasi manufaktur, mengintegrasikan rantai pasokan lintas industri, dan memungkinkan konsentrasi infrastruktur yang diperlukan untuk produksi dan akses ke pasar[2].

Di Indonesia, private power utility /Captive Power (perusahaan listrik swasta) mulai berkembang seiring perkembangan pesat kawasan industri. Terdapat sedikitnya lima private power utility di Indonesia, tiga private power utility di antaranya PT Bekasi Power, PT Cikarang Listrindo Tbk, dan PT Kariangau Power. Tujuan penulisan ini adalah untuk mengkaji pemanfaatan HTGR sebagai captive power untuk Kawasan industri.

Kawasan industri besar sangat membutuhkan listrik dan panas proses yang saat ini dipasok oleh pembangkit konvensional: jika pembangkit kogenerasi nuklir menggantikannya, mereka harus menyediakan layanan yang sama'[3]

Kogenerasi nuklir, yang dikenal sebagai gabungan panas dan daya listrik (*Combine Heat and Power* (CHP)). CHP ini sangat efisien, bersih, dan handal untuk menghasilkan daya listrik dan energi termal dari satu sumber bahan bakar. Pembangkit listrik tenaga nuklir memiliki efisiensi panas yang rendah umumnya berkisar antara 30 - 35% dibandingkan dengan sistem konversi energi siklus uap. Efisiensi semacam itu dapat ditingkatkan hingga 80% melalui kogenerasi listrik dengan aplikasi lain seperti desalinasi air laut, produksi hidrogen, pemanasan atau pendinginan distrik, atau aplikasi panas industri lainnya.[4]

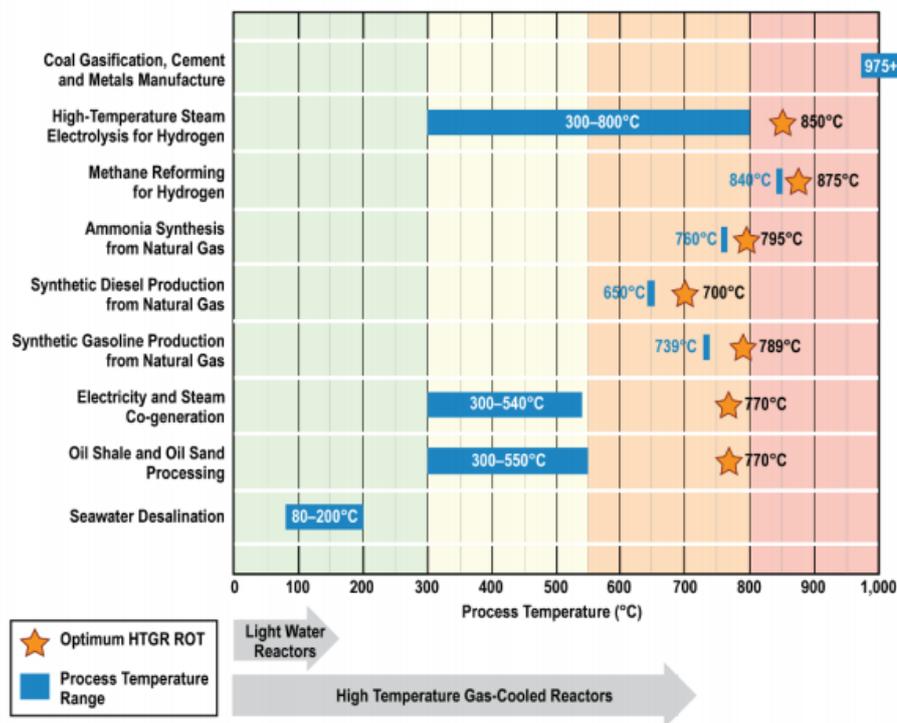
Reaktor Berpendingin Gas Suhu Tinggi (*High Temperature Gas Cooled Reactor* (HTGR)) merupakan konsep yang cocok dan aman dari pembangkit listrik tenaga nuklir di masa depan dengan potensi untuk menghasilkan panas proses untuk digunakan di industri seperti reformasi gas alam, gasifikasi dan pencairan batubara, pemulihan minyak berat hingga melayani untuk produksi komoditas hidrogen atau energi yang dapat disimpan sebagai bahan bakar transportasi di masa depan. Makalah ini akan menjelaskan deskripsi berbagai aplikasi untuk panas proses HTGR dan panas yang dibutuhkan oleh industri.[5]

## METODOLOGI

Metodologi yang digunakan adalah studi literatur dengan mengambil referensi dari jurnal, laporan akhir, serta informasi lainnya.

## TEKNOLOGI HTGR DAN APLIKASI PANAS

Sistem reaktor suhu tinggi (HTR) (yaitu, reaktor dengan suhu outlet inti antara 700 °C - 950 °C) menawarkan efisiensi termodinamika yang lebih tinggi untuk mengubah panas yang dihasilkan dalam reaktor menjadi listrik (misal~ 50% pada 950 °C atau 47% pada 850 °C). Namun, bagi perancang reaktor, suhu yang lebih tinggi akan membatasi jumlah bahan bakar, sistem pendingin, dan pilihan material yang tersedia untuk reaktor nuklir, meningkatkan tekanan pada bahan-bahan seperti paduan logam berbasis nikel, grafit, dan keramik yang bertekanan tinggi, dan meningkatkan motivasi penelitian dan pengembangan pada material. Temperatur outlet yang tinggi ini juga dapat memasok panas proses untuk berbagai aplikasi industri. Secara internasional, hanya ada dua sistem suhu tinggi yang dipertimbangkan: suhu tinggi berpendingin gas sistem reaktor (High Temperature Gas-cooled Reactor, HTGR) dan reaktor garam cair (Molten Salt Reactor, MSR). Tujuh HTR berpendingin gas telah dibangun di Inggris, Jerman, Amerika Serikat, Jepang, dan Cina. Kapasitas daya reaktor dari 10 MWt hingga 842 MWt, didasarkan pada desain bahan bakar nuklir *prismatik* dan *pubble bed*, dan telah dikembangkan dua unit reaktor yaitu reaktor prototipe dan reactor demonstrasi masing-masing menggunakan bahan bakar *pubble bed* (HTGR) berkapasitas 250MWt dan 500 MWt yang sedang dibangun di Cina; lima lainnya direncanakan di tahun-tahun mendatang. Jadi, itu teknologi cukup matang, meskipun belum sampai ke tahap komersial di sebagian besar pasar.[6]



Gambar 1. Suhu outlet HTGR yang optimal dan kisaran suhu proses yang terkait dengan proses industri terintegrasi HTGR.[7]

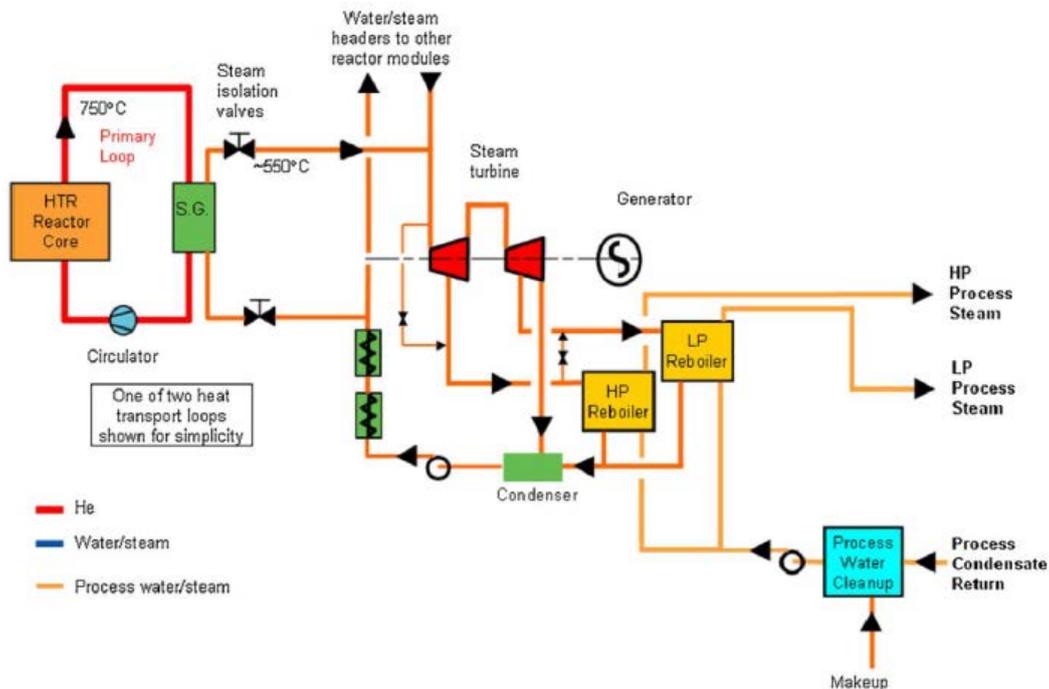
### HASIL DAN PEMBAHASAN

HTGR mampu membuat proses uap pada suhu dan tekanan yang cukup besar untuk mendukung berbagai proses panas industri. Pembangunan HTGR untuk kogenerasi panas dan listrik dihubungkan ke industri yang membutuhkan panas perlu beberapa langkah. Langkah pertama adalah mengidentifikasi secara teknis, industri, ekonomi, perizinan dan sistem keselamatan serta menemukan pasar potensial yang dapat dipasok dalam waktu yang lebih lama. Langkah terakhir adalah pengembangan konsep reaktor demo. Pengguna proses panas mengekspresikan mereka pada persyaratan dalam hal kebutuhan dan kendala operasi, sedangkan dari sisi reaktor nuklir mengembangkan kinerja teknologi HTGR.[9]

Seperti yang dilaporkan dalam Angulo et al. [8], hasil analitik pertama telah diperoleh kategorisasi proses kimia menjadi tiga kelas menurut suhu dan teknologi yang digunakan:

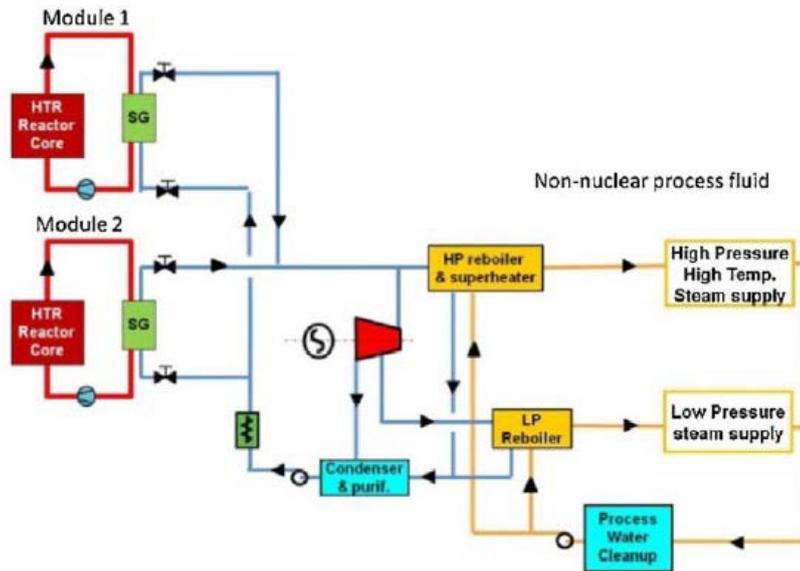
- (1) Kelas uap: Proses yang membutuhkan uap sebagai transportasi panas dan media pemanas dalam kisaran 150-600 °C. Sebagai contoh seperti pengeringan, pemanasan distrik, desalinasi oleh penguapan MSF, distilasi di kilang, atau pembangkit listrik dengan turbin uap;
- (2) Kelas kimia: Proses di mana panas adalah penggerak reaksi kimia dan dikonsumsi sebagai reaksi entalpi pada suhu konstan, berlangsung pada kisaran 600-900 °C, seperti produksi turunan minyak, atau turunan metana, biomassa dan batubara;
- (3) Kelas mineral: Proses di mana panas digunakan untuk melelehkan padatan atau untuk mendorong reaksi antar padatan, biasanya berlangsung pada suhu di atas 1000 °C.

Gambar 2. menunjukkan contoh konfigurasi dasar dari fasilitas kogenerasi panas proses komersial prototipe, yang ditandai dengan produksi uap sekunder dengan siklus konversi daya topping dan dua pilihan untuk mengekstraksi panas proses pada suhu yang berbeda [9].



Gambar 2. Contoh pembangkit kogenerasi Eropa[10]

Persepsi bahwa, pada langkah pertama, *steam coupling* akan menjadi skema yang paling tepat untuk prototipe (lihat Gambar 3) didasarkan pada fakta bahwa hanya pengembangan terbatas yang diperlukan sehubungan dengan teknologi perpindahan panas dari pabrik HTGR ke pengguna akhir khusus melalui generator uap. Angulo et al. [11] melaporkan bahwa "ukuran daya yang paling cocok untuk HTR harus dinilai tergantung pada desain inti (prismatik atau *pubble bed*) dan jumlah loop primer."



Gambar 3. Skema coupling dengan generator uap.[12]

Sebagai gambaran konsep kogenerasi nuklir yang dapat menyediakan panas dan listrik di dalam suatu Kawasan industri telah dirancang oleh NC21 (Nuclear Cogeneration Industrial Institute di Eropa).[13]



Gambar 4. Konsep Kogenerasi nuklir menyediakan panas dan listrik untuk industri

Industri Eropa telah berupaya mengurangi emisi CO<sub>2</sub>, mengurangi ketergantungan bahan bakar fosil serta pajak karbon dan mengamankan pasokan energi dengan mengembangkan kogenerasi nuklir.

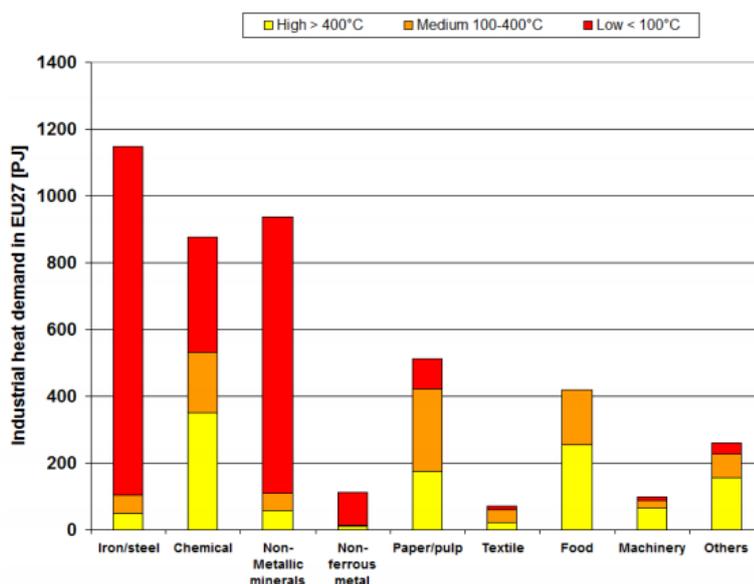
Kogenerasi nuklir suhu rendah telah diaplikasikan di beberapa negara Eropa, misal. untuk pemanasan distrik atau industri kertas di Slovakia, Hongaria, Swiss dan Norwegia.

Beberapa negara UE seperti Polandia dan Belanda telah menyatakan di tingkat menteri atas dukungannya untuk pengembangan kogenerasi.

Sektor industri dan komersial mengkonsumsi energi dalam jumlah besar dalam sistem boiler yang digunakan untuk pemanasan dengan air panas atau uap dalam aplikasi proses industri. Persyaratan ukuran unit nuklir untuk aplikasi industri dapat menyebabkan desain yang lebih besar dan lebih kecil

dari norma saat ini. Misalnya, produksi hidrogen nuklir untuk pemurnian minyak bumi, yang mungkin mendekati peluang jangka, dan proses industri lainnya mungkin membutuhkan unit yang lebih kecil di kisaran 50-500 MW (th). Sebagai pelanggan dapat mengoperasikan lebih dari satu boiler.[14].

Dalam studi Komisi Eropa, Pardo et al. [14] kebutuhan panas dan pendingin untuk industri di 27 Negara Anggota UE (EU27) (lihat Gambar 5). Jumlah total konsumsi panas (sebagaimana tercantum dalam kolom terakhir dari Tabel 2) menunjukkan bahwa 55% dari permintaan panas industri adalah panas bersuhu rendah (<100 °C), sedangkan 19% berada di kisaran menengah dan 26% dalam kisaran suhu tinggi (> 400 °C). Total konsumsi panas industri di EU27 di 2009 menurun sekitar 20% dibandingkan tahun 2005 pada sektor besi dan baja, mineral bukan logam dan bahan kimia.



Gambar 5. Permintaan panas industri EU27 dalam sektor dan suhu[14]

Tabel 2. Konsumsi Energi Industri EU27 (2005-2009)[14]

Sektor	Energi Listrik (PJ)		Panas yang akan digunakan (PJ)		Total Energi Final (PJ)	
	2005	2009	2005	2009	2005	2009
Besi dan Baja	488	393	1695	1147	2622	1853
Logam bukan besi	291	223	149	113	486	373
Kimia	736	629	955	877	2480	2109
Mineral Bukan Logam	298	267	1209	937	1820	1529
Kertas dan Bubur Kertas	510	443	549	512	1476	1583
Makanan, Minuman dan Tembakau	401	393	481	418	1261	1149
Tekstil	119	85	120	72	331	126
Industri lainnya	1228	1099	191	358	3163	2669
Total	4072	3532	5349	4434	13.640	11.282

Di dalam industri yang dinilai sebagai prioritas tinggi atau menengah, produk dan proses khusus diidentifikasi untuk pertimbangan lebih lanjut. Karena penerapan teknologi HTGR untuk proses industri akan memerlukan berbagai perkembangan teknologi, setiap aplikasi diklasifikasikan sebagai "jangka pendek" atau "jangka panjang."

- Aplikasi jangka pendek adalah yang saat ini digunakan pada skala industri dan dapat menggabungkan energi proses HTGR tanpa pengembangan teknologi yang signifikan.

- Aplikasi jangka panjang adalah pemisahan air thermo-kimia, yang belum dibuktikan pada skala industri, seperti penggunaan panas HTGR untuk proses gasifikasi batubara. Karena peralatan industri yang ada menghasilkan panas oleh oksidasi parsial dari bahan baku, sehingga membutuhkan pengembangan teknologi proses baru untuk memasukkan panas HTGR.

Tabel 3 Skrining hasil evaluasi yang berisi daftar produk dan proses spesifik yang diidentifikasi sesuai dengan suhu prosesnya.

Tabel 3. Skrining hasil evaluasi

Industri	Penilaian	Prioritas
Pemurnian minyak bumi	Proses pemurnian berjenjang mempunyai permintaan temperature proses yang tinggi	Tinggi
Pemulihan minyak	Ekstraksi bitumen in situ mempunyai permintaan yang sangat tinggi, temperature proses disesuaikan.	Tinggi
Batubara dan Gas alam turunannya	Hydrogen, synggas dan produksi bahan bakar cair dari batubara dan gas alam membutuhkan temperatur proses yang tinggi.	Tinggi
Petrokimia	Proses produksi petrokimia membutuhkan teperatur suhu yang tinggi	Tinggi
Gas industry (Hdrogen)	Steam methane reforming dan metode produksi hidrogen maju memiliki kebutuhan energi yang tinggi dan suhu proses yang sesuai	Tinggi
Pupuk (Amoniak, Nitrat)	Produksi amoniak memerlukan energi yang tinggi dan suhu proses yang sesuai.	Tinggi
Logam	Pengurangan langsung produksi besi memiliki permintaan energi yang tinggi, suhu proses yang sesuai, dan pertumbuhan global yang kuat.	Tinggi
Produk Polimer (Plastik, Fiber)	Beberapa polimer membutuhkan energi yang tinggi dengan suhu proses yang sesuai	Sedang
Semen	Kebutuhan temperature/suhu proses produksi disesuaikan dengan perkembangan teknologi.	Sedang
Farmasi	Energi proses yang dibutuhkan untuk industri farmasi per pembangkit relative rendah	Rendah
Kertas	Energi yang dibutuhkan untuk pabrik kertas rendah, pembakaran membutuhkan energi setengah dari kebutuhan uap dan listrik pada produsen kertas	Rendah
Kaca	suhu proses produksi kaca juga tinggi	Rendah

Pengguna Energi dan Panas Proses pada Industri manufaktur terbesar dianggap sebagai prioritas tertinggi untuk aplikasi potensial teknologi HTGR. Berdasarkan tinjauan sektor manufaktur di Amerika Serikat, terdapat lima sektor dipilih untuk disaring: 1) produk minyak bumi, batu bara dan gas alam, 2) bahan kimia, 3) logam primer, 4) kertas, dan 5) produk mineral non-logam.

## KESIMPULAN

*Captive Power*, atau Pembangkit Terintegrasi (PPUs), atau tenaga listrik yang dihasilkan oleh pemilik lahan untuk digunakan sendiri/digunakan oleh perusahaan lain, mengurangi muatan terhadap jaringan listrik. *Captive power* dapat meningkatkan keandalan, mengurangi biaya usaha, dan dapat dengan cepat menyalurkan tenaga listrik ke wilayah yang kekurangan. Teknologi HTGR merupakan salah satu solusi untuk pemanfaatan listrik dan panas bagi industri. Saat ini pembangkit listrik captive power di Indonesia masih didominasi

oleh pembangkit diesel. Untuk dapat memanfaatkan aplikasi dari teknologi HTGR diperlukan studi lebih lanjut.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kami kepada Bapak Ir. Sriyana, M.T selaku Kepala Bidang Kajian Infrastruktur yang telah membantu baik memberikan masukan yang bersifat membangun demi penyelesaian Karya Tulis Ilmiah ini.

#### DAFTAR PUSTAKA

1. Pembangkit Terintegrasi: Manfaat Ekonomi Captive Power di Kawasan Industri di Indonesia, Maret 2016. [www.pwc.com/id](http://www.pwc.com/id)
2. PWC, Private Power Utilities: The Economic Benefits of Captive Power in Industrial Estates in Indonesia, Maret 2016.
3. Dominique Hittner AREVA, HTGR technology status and gap analysis, NC2I Conference, Brussels, 14-15/09/2015.
4. I. Khamis\*1), T. Koshy2) and K.C. Kavvadias3), 1), 2), 3) *International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna International Centre, P.O. Box 100, A-1400, Vienna, Austria. \*Tel: (+431) 2600-22822 or 22815; Fax: (+431)2600 29598; "Opportunity for Cogeneration in Nuclear Power Plants", The 2013 World Congress on Advanced in Nano, Biomechanics Robotics and Energy Research (ANBRE13), Seoul Korea, August 25-28, 2013.*
5. Karl VERFONDERN1, Werner VON LENSE, Research Center Jülich, 52425 Jülich, Germany, "European Research and Development on HTGR Process Heat Applications", GENES4/ANP2003, Sep. 15-19, 2003, Kyoto, JAPAN, Paper 1126.
6. C TA 4.J: High Temperature Reactors, chapter 4: Advancing Clean Electric Power Technologies Technology Assessments, Quadrennial Technology Review 2015.
7. "Optimum Reactor Outlet Temperature for High Temperature Gas-Cooled Reactors Integrated with Industrial Processes," INL/EXT-11-21537, April 2011.
8. Juergen Kupitz and John B. Dee, International status of HTGRs, Advance Nuclear Power System.
9. No. NP-T-4.1."Opportunities for Cogeneration with Nuclear Energy", IAEA 2017
10. ANGULO, C., et al., EUROPAIRS: The European project on coupling of high temperature reactors with industrial processes, Nuc. Eng. Des. **251** (2012) 30–37.
11. <http://www.snetp.eu/nc2i/>
12. No. NP-T-4.3," Industrial Applications of Nuclear Energy", IAEA 2017.
13. PARDO, N., VATOPOULOS, K., KROOK-RIEKKOLA, A., MOYA, J.A., PEREZ, A., Heat and Cooling Demand and Market Perspective, Publications Office of the European Union, Luxembourg (2012).
14. Joseph Konnefal, Dave Rackiewicz, NGNP Project - Battelle Energy Alliance, "Survey of HTGR Process Energy Applications", MPR-3181 Revision 0 May 2008,

## **PROGRAM *ENERGIEWENDE* DI JERMAN DAN RENCANA PEMANFAATAN ENERGI TERBARUKAN DI INDONESIA**

**Sunarko<sup>1</sup>, Denissa B. Syahna<sup>1</sup>, Slamet Suryanto<sup>1</sup>**

<sup>1,2</sup> BATAN, Jl. Kuningan Barat, Jakarta Selatan 12070

email: sunarko@batan.go.id

### **ABSTRAK**

**PROGRAM *ENERGIEWENDE* DI JERMAN DAN TANTANGAN PEMANFAATAN ENERGI TERBARUKAN DI INDONESIA.** Program *Energiewende* atau transisi energi di Jerman memiliki tiga tujuan utama yaitu untuk meningkatkan proporsi energi terbarukan dalam bauran energi, mengurangi konsumsi energi dan mengurangi emisi gas rumah kaca (GRK). Target peningkatan porsi energi terbarukan tampaknya akan dapat dicapai mengingat porsi pada tahun 2018 ini telah mencapai sekitar 30%. Kendati demikian, pengurangan konsumsi energi dan GRK diprediksi akan gagal dicapai karena pada saat yang bersamaan, Jerman secara bertahap tengah mengurangi peran pembangkitan energi yang bebas emisi GRK yaitu energi nuklir. Untuk menggantikan pasokan listrik nuklir tersebut Jerman harus kembali membangun PLTU berbahan bakar fosil dan gas karena fluktuasi alamiah dari produksi energi terbarukan tetap memerlukan cadangan dari pembangkit fosil yang memproduksi GRK (CO<sub>2</sub>). Hal ini membuat target reduksi GRK menjadi semakin sulit dicapai. Harga listrik dan subsidi pemerintah terus menunjukkan kecenderungan untuk naik dan pengguna rumah tangga harus menanggung kenaikan tersebut. Harga listrik yang tinggi disebabkan oleh harga produksi listrik yang tinggi ditambah biaya untuk ekspansi dan modernisasi jaringan untuk mengakomodasi sistem kelistrikan dengan energi terbarukan. Meskipun harga listrik tinggi dan reduksi CO<sub>2</sub> tidak mencapai target, program *Energiewende* tetap mendapatkan penerimaan yang baik dari masyarakat dan memiliki dukungan politik yang kuat. Bagi Indonesia, terdapat beberapa hal yang dapat dicermati terkait biaya, dampak dan penerimaan publik dalam implementasi kebijakan energi terbarukan seperti di Jerman dalam hal mengelola harga listrik dan subsidi karena hal itu merupakan faktor yang sensitif yang dapat menimbulkan gejolak sosial dan karena Indonesia masih menganut rezim subsidi untuk menciptakan harga listrik yang murah. Faktor-faktor lain seperti kondisi geografis, teknologi penyimpanan energi serta biaya penelitian dan pengembangan harus dipertimbangkan agar Indonesia nantinya dapat mengembangkan energi terbarukan secara mandiri dan tidak sekedar menjadi pasar teknologi terbarukan.

Kata kunci: Reduksi emisi, fluktuasi alamiah, subsidi, pelajaran berharga, harga listrik.

### **ABSTRACT**

**ENERGIEWENDE IN GERMANY AND CHALLENGES IN RENEWABLE ENERGY DEVELOPMENT PROGRAM IN INDONESIA.** The objectives of *Energiewende* or energy turnaround program in Germany are to increase the share of renewable energy, reduce electricity consumption and decrease greenhouse gasses (GHG) emission in the form of CO<sub>2</sub>. The first objective has been achieved as renewables share in Germany has reached about 30%, but the other objectives have not been as successful. As an addition, Germany is reducing the role of nuclear electricity, which is GHG free, and replacing the capacity with renewables. It has been identified that natural fluctuation of renewable energy production still requires backups from fossil plants, which are CO<sub>2</sub> emitters. This makes the third objective even harder to achieve. Furthermore, electricity price and government subsidy has seen steady increase and household users are paying the price due to electricity production price, grid expansion and modernization, etc. Nonetheless, the program still receive broad acceptance from the public due to strong political support. Indonesia should learn from Germany with respect to cost, effect and public acceptance upon implementing the renewable energy program in order to manage electricity price and subsidy because they are sensitive factors leading to social disturbance and since Indonesia still adopts subsidy regime to create affordable electricity. Other factors such as geographical condition, energy storage, research and development cost need to be considered for greater self-reliance in renewable energy development and avoiding Indonesia from becoming merely a technology market.

*Keyword: emission reduction, intermittent, subsidy, lesson learned, electricity cost*

## PENDAHULUAN

Indonesia adalah negara berkembang dengan populasi yang pada tahun 2018 ini mencapai 265 juta dengan laju pertumbuhan penduduk dan ekonomi yang cukup tinggi, masing-masing sebesar 1,2% dan 5,25%. Proyeksi kebutuhan energi, khususnya listrik, juga tinggi dan diperkirakan mencapai rata-rata sekitar 7,1% hingga tahun 2050 [1]. Untuk memenuhi dan mengantisipasi kebutuhan listrik, pemerintah mencanangkan program pembangunan pembangkit listrik 35.000 MW, yang sebagian besar adalah pembangkit energi berbahan-bakar fosil sehingga Indonesia masih akan bertumpu pada energi tak-terbarukan seperti energi fosil sebagai komponen bauran energi utama.

Pada akhir tahun 2017, rasio elektrifikasi di Indonesia telah mencapai 95,35% [2] dengan kapasitas terpasang sejumlah 61 GW. Baru 1.207 MW atau kurang dari 2% diantaranya dibangkitkan menggunakan energi terbarukan seperti energi angin dan surya sehingga Indonesia masih termasuk dalam penghasil gas rumah kaca (GRK) yang terbesar di dunia. Emisi GRK Indonesia diproyeksikan masih akan terus meningkat sejalan dengan terus naiknya permintaan energi listrik dan penggunaan energi fosil [3]. Sebagai upaya reduksi GRK, paska pertemuan COP21 (*Conference of Parties* ke 21, Kerangka Kerja PBB untuk Perubahan Iklim) di Paris pada bulan Desember 2015, Indonesia berikrar untuk mengurangi emisi CO<sub>2</sub> sebanyak 29% pada tahun 2030 bila dibandingkan dengan tingkat emisi tahun 2015. Dengan bantuan internasional, target tersebut diproyeksikan ditingkatkan menjadi 41%. Kementerian ESDM menyebutkan bahwa reduksi emisi CO<sub>2</sub> akan dicapai melalui konservasi energi dan mengalihkan pembangkitan listrik dari energi fosil ke energi terbarukan [2].

Di belahan dunia lain, berbekal dukungan politik yang kuat, Jerman telah mencanangkan penggunaan energi terbarukan secara progresif melalui program *Energiewende*, yang secara literal berarti transisi atau transformasi energi. Program ini diluncurkan pada tahun 2010 dan memiliki tiga target utama hingga tahun 2020 [4] yaitu proporsi energi terbarukan yang mencapai 40% hingga tahun 2020, pengurangan konsumsi energi hingga 20%, dan reduksi emisi GRK dengan dasar perhitungan tahun 1990. Di sisi lain, Jerman berniat untuk menggantikan energi yang dianggap "kotor" namun sebenarnya bebas GRK, yaitu energi nuklir, dan menggantikannya dengan energi terbarukan seperti energi matahari dan angin, yang dianggap lebih "bersih" dan tanpa emisi CO<sub>2</sub>. Kecelakaan PLTN Fukushima di Jepang pada tahun 2011 memberikan dorongan politik yang sangat kuat bagi Jerman untuk mempercepat penghentian pemanfaatan energi nuklir dan menggantikannya dengan sumber energi lain.

Meskipun pengembangan energi terbarukan dilakukan secara besar-besaran dan porsi energi terbarukan terus mengalami peningkatan, beberapa tahun belakangan ini dilaporkan bahwa reduksi emisi CO<sub>2</sub> di Jerman cenderung stagnan dan bahkan Jerman diprediksikan akan gagal mencapai target reduksi konsumsi energi dan reduksi emisi GRK untuk tahun 2020. Selain itu, harga listrik juga mengalami kecenderungan terus meningkat, demikian juga dengan nilai subsidi yang diberikan Jerman kepada listrik terbarukan yang terus membesar sehingga menimbulkan diskursus tentang berapa nilai subsidi yang layak diberikan oleh pemerintah dan siapa saja pihak yang harus menanggung bebannya karena sebagian pengguna listrik besar dari kalangan industri justru dibebaskan dari beban tersebut.

Dalam tulisan ini, dilakukan tinjauan literatur terhadap perkembangan dari program *Energiewende* berdasarkan data-data yang tersedia dari aspek keberhasilan reduksi emisi CO<sub>2</sub>, harga listrik, besaran subsidi yang diberikan, dan lain-lain untuk mendapatkan informasi-informasi berharga yang dapat dipelajari dan dianalisis sebagai pelajaran (*lesson learned*) dan sebagai masukan bagi Indonesia yang sedang berusaha meningkatkan porsi energi terbarukan dalam bauran energinya.

## POKOK BAHASAN

Meninjau pengalaman Jerman dalam pemanfaatan energi terbarukan sebagaimana dijelaskan di atas yang ditujukan antara lain untuk pengurangan emisi CO<sub>2</sub> dan kebijakan yang sama juga sedang dijalankan di Indonesia, perlu diidentifikasi hal-hal apa sajakah yang perlu diperhatikan dari penerapan program reformasi energi di Jerman sehingga penggunaan energi terbarukan di Indonesia yang ditujukan antara lain untuk mendukung

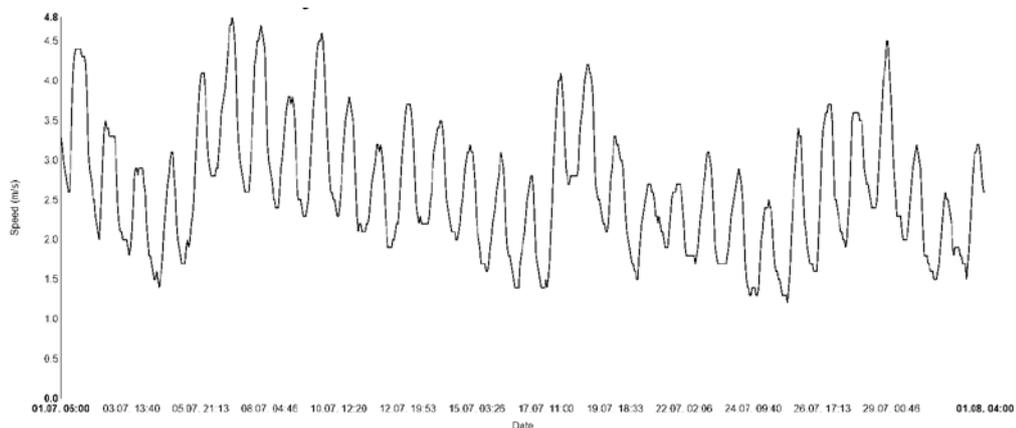
penurunan emisi GRK, tidak diikuti dengan penambahan beban subsidi dan membebani konsumen dengan harga listrik yang tinggi. Selain itu penting untuk diulas bagaimana Indonesia dapat memiliki strategi tersendiri dengan mempertimbangkan faktor-faktor lain seperti faktor sosial, geografis dan penguasaan ilmu dan teknologi.

## METODOLOGI

Tulisan ini disusun secara deskriptif analitik dengan cara pengumpulan dan analisis data dan literatur untuk mendapatkan hubungan-hubungan antara faktor-faktor yang dianggap penting yang dipertimbangkan. Analisis dilakukan untuk mendapatkan sari permasalahan dan dituangkan dalam pembahasan. Kesimpulan terhadap pembahasan diberikan pada bagian akhir dari tulisan ini terutama tentang hal-hal yang penting untuk diperhatikan terkait program energi terbarukan di Indonesia. Data yang digunakan dalam tulisan ini mencakup data sekunder yang bersumber dari karya tulis ilmiah, karya jurnalistik, dan data yang tersedia secara daring dari lembaga yang berwenang.

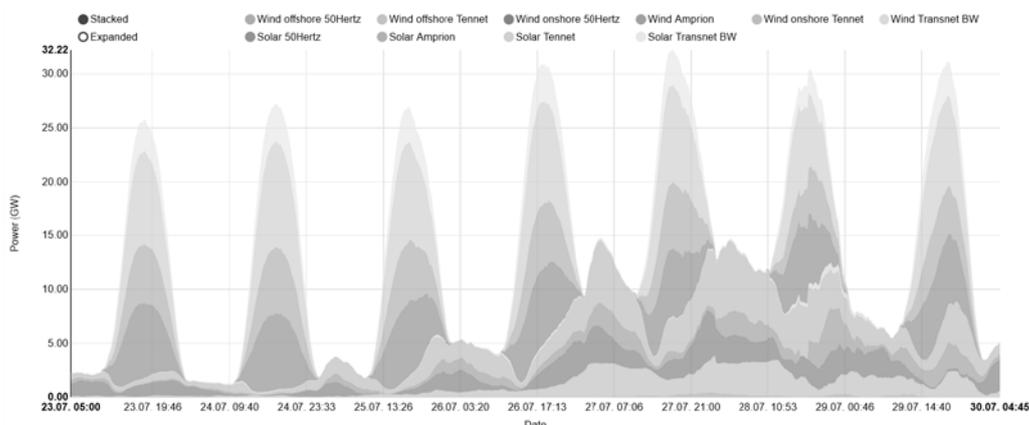
## HASIL DAN PEMBAHASAN

Potensi energi terbarukan, khususnya energi surya dan energi angin di Indonesia mencapai kapasitas masing-masing sebesar 4,8 kWh/m<sup>2</sup>/hari dan 970 MW pada kecepatan angin 4-6 m/detik [5]. Kapasitas terpasang energi surya saat ini adalah sebesar 70 MW [2] dan energi angin mencapai 100 MW dengan dibangunnya PLTB Sidrap I dan II. Dapat difahami bahwa tiupan angin dan sinar matahari tidak tersedia setiap saat. Tiupan angin dan sinar matahari mengandung fluktuasi alamiah karena adanya perubahan malam dan siang serta perubahan tekanan udara sehingga listrik yang dihasilkannya dapat berfluktuasi pula (*intermittent*). Contoh dari fenomena ini ditunjukkan oleh data kecepatan angin rata-rata selama bulan Juli 2018 dari pengamatan di seluruh Jerman (**Gambar 1**) [6]. Dapat diamati bahwa selain fluktuasi harian terdapat kecenderungan perubahan selama periode waktu tertentu seperti pada periode tanggal 5 Juli – 17 Juli yang memiliki kecenderungan penurunan rata-rata kecepatan angin. Oleh karena itu, pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) tidak dapat menghasilkan listrik secara tetap sepanjang waktu, namun bergantung pada ada atau tidaknya angin atau sinar matahari. Kekurangan kapasitas pembangkitan yang terjadi tentu harus dikompensasi menggunakan pembangkit energi konvensional lainnya dan untuk hal ini Jerman masih mengandalkan bahan bakar fosil seperti batubara dan gas.



Gambar 1. Kecepatan angin rata-rata di Jerman (Juli 2018)

Data dari lembaga Fraunhofer[6] mengenai kapasitas pembangkitan energi terbarukan (**Gambar 2**) memberikan ilustrasi mengenai fluktuasi pembangkitan listrik pada minggu ke-30 tahun 2018 di seluruh Jerman. Fluktuasi total pembangkitan terbarukan mencapai hampir 30 GW dari kapasitas pembangkitan total sebesar 102,52 GW pada tahun 2018 ini. Dapat dikatakan bahwa efisiensi maksimum pembangkitan jenis ini berkisar 30%. Terlihat pula bahwa kapasitas pembangkitan dari angin berfluktuasi tidak hanya dalam segi jumlah namun juga dalam segi waktu, yaitu tidak semua hari dalam satu minggu angin bertiup sama kuatnya dan pada minggu ke-30 angin bertiup optimal pada 3-4 hari saja. Kapasitas pembangkitan menggunakan angin baik di darat dan lepas pantai mencapai maksimum sekitar 15 GW dari total sebesar 58,2 atau maksimum sekitar 25%.

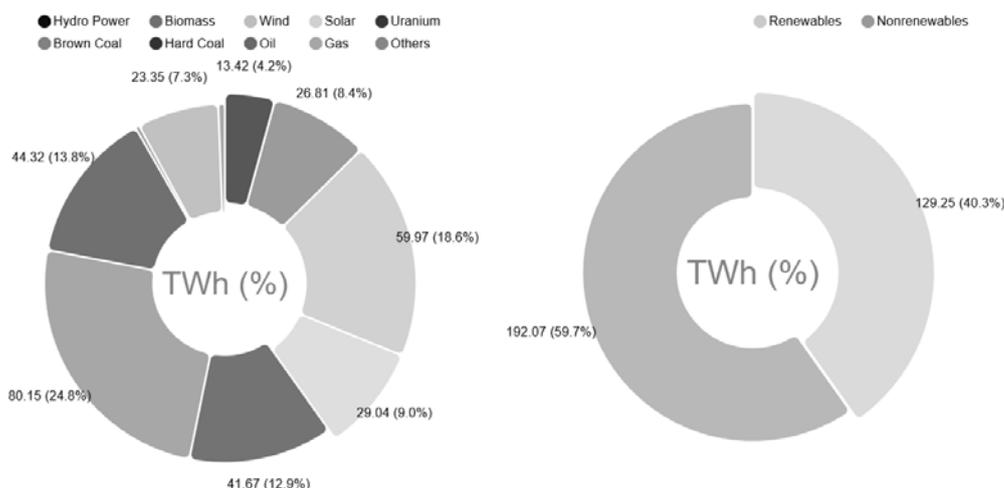


Gambar 2. Produksi energi terbarukan (Juli 2018)[6]

Tabel 1. Kapasitas pembangkitan listrik di Jerman[6]

No	Jenis pembangkit	Kapasitas (GW)
1	PLT-Air	5,49
2	PLT-Biomassa	7,40
3	PLTN	9,52
4	PLTU-Batubara energi rendah	21,20
5	PLTU-Batubara energi tinggi	25,05
6	PLT-Minyak	4,44
7	PLTU-Gas	29,55
8	PLT-Angin darat	52,82
9	PLT-Angin lepas pantai	5,38
10	PLT-Surya	44,32

Ditinjau dari jenis batubara yang digunakan di Jerman hanya sekitar separuh dari total batubara merupakan batubara bersih (25,05 GW) dari total pembangkitan batubara yang ada (46,25 GW) dan sisanya adalah batubara kotor. Namun demikian, pembangkit yang menggunakan batubara bersih sekalipun tidak bebas dari emisi GRK. Sebagian lagi listrik dihasilkan oleh PLTU gas dan kapasitas pembangkitannya mencapai 29,55 MW. Dengan masih besarnya porsi energi fosil, maka emisi GRK di Jerman masih sulit untuk diturunkan secara signifikan meskipun penggunaan energi terbarukan telah jauh meningkat.

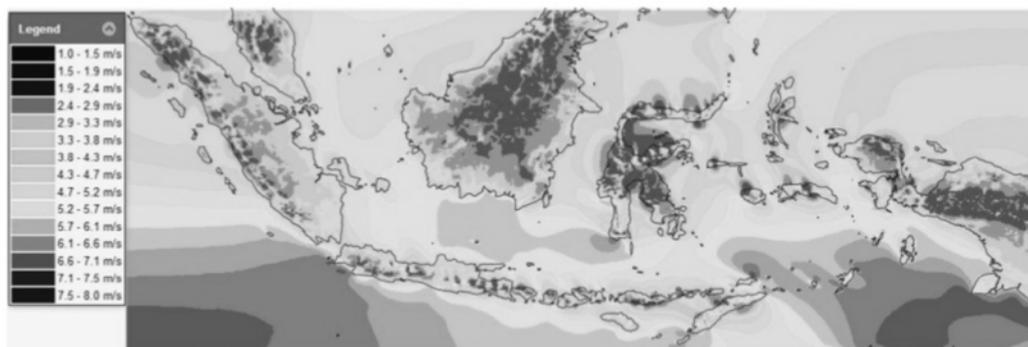


Gambar 3. Bauran Energi di Jerman (Juli 2018)[6]

Ditinjau dari segi faktor geografis, karena Jerman berada di daratan Eropa maka tersedia jaringan listrik antar-negara yang terintegrasi baik sehingga kekurangan dan kelebihan energi listrik ini dapat diatasi melalui skema impor-ekspor energi listrik dengan

negara-negara tetangganya. Data dari 10 tahun terakhir menunjukkan bahwa Jerman merupakan net-eksporter energi listrik di Eropa. Dari segi impor listrik, Jerman mayoritas mengimpor listrik dari Perancis dan Republik Ceko yang keduanya memanfaatkan produksi listrik nuklir sedangkan tujuan ekspor listrik utamanya adalah Austria, Swiss dan Belanda. Kekurangan pasokan listrik di negara-negara tetangga dapat digunakan sebagai sarana menjual kelebihan energi, terutama ketika produksi energi terbarukan mencapai puncaknya.

Jerman saat ini juga merupakan pengekspor netto listrik ke negara-negara tetangganya. Kapasitas terpasang pada tahun 2018 mencapai 205,16 GW sedangkan konsumsi puncak hanya mencapai 80,33 GW sehingga sisanya bisa diekspor ke negara lain. Bila di masa mendatang negara-negara tetangga memiliki kapasitas pembangkitan yang lebih seimbang dengan permintaan maka eksekspansi kapasitas pembangkitan di Jerman bisa menjadi sangat tinggi dan harga listrik dapat menjadi semakin negatif pada saat-saat tertentu. Ketika negara-negara tetangga Jerman sudah mencapai kemandirian pasokan listrik, maka Jerman harus berpikir lebih keras lagi bagaimana menyimpan kelebihan energi listriknya. Keuntungan geografis dapat pula dimanfaatkan dengan melakukan penyimpanan energi listrik dalam bentuk *pumping storage* di negara sendiri maupun negara tetangga seperti di Vianden (1.296 MW) di Luxembourg and COO I and II (1.164 MW) di Belgia. Selain itu, sedang pula dibangun penyimpanan baterai seperti proyek di Jardelund yang merupakan penyimpanan energi dalam bentuk baterai lithium-ion terbesar di Eropa dengan kapasitas penyimpanan sekitar 50 MWh [7].



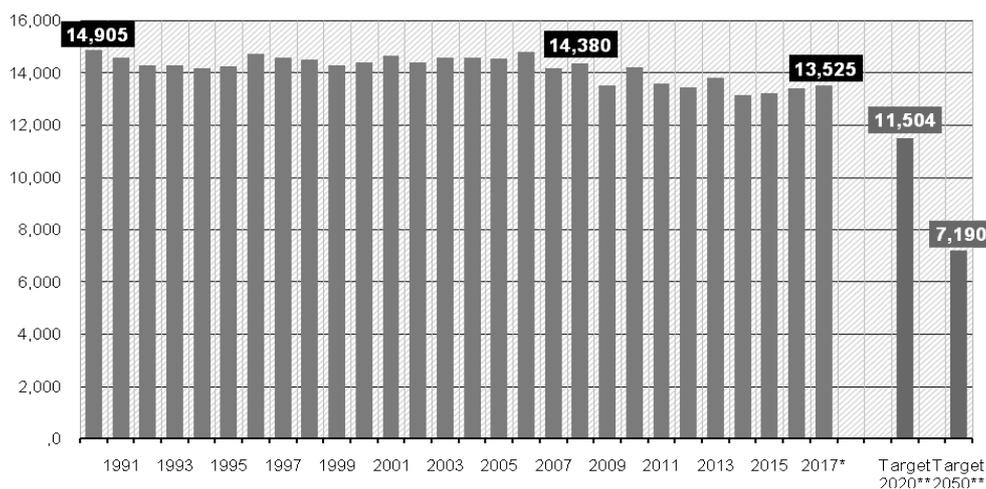
Gambar 4. Kecepatan angin rata-rata tahunan di Indonesia (h = 50 m)

Terkait dengan potensi energi angin, data rerata kecepatan angin di Indonesia [EBTKE, 14] (**Gambar 4**) menunjukkan bahwa di sebagian besar kepulauan Indonesia angin bertiup dengan kecepatan relatif rendah yaitu dibawah 3,3 m/detik pada ketinggian 50 meter kecuali di beberapa daerah seperti di sebagian kecil Sulawesi Selatan. Angin dengan kecepatan seperti ini sebenarnya termasuk kategori kurang baik menurut Argonne National Laboratory (ANL). Daerah dengan tiupan angin rata-rata tahunan dengan kategori baik akan memiliki kecepatan 5,8 m/detik atau lebih. Sebagian besar wilayah Kalimantan, Sulawesi dan Papua memiliki potensi pemanfaatan PLTB yang relatif lebih besar dibandingkan pulau-pulau lain. Tetapi pada daerah-daerah tersebut permintaan listrik masih relatif kecil dan tersebar mengikuti sebaran pusat-pusat penduduk. Terlebih lagi, PLTB dan PLTS fotovoltaik cenderung akan menimbulkan ketidakstabilan jaringan [10] sehingga PLN harus membatasi kapasitas pembangkitan terbarukan pada tingkat 10-15% dari beban puncak. Dengan demikian, maka potensi alamiah yang ada akan cenderung tidak termanfaatkan secara penuh. Dengan tersebarnya pusat penduduk dan kondisi Indonesia yang berbentuk kepulauan, maka pengembangan jaringan listrik antar-pulau secara terintegrasi dapat menelan biaya yang sangat mahal. Opsi penyimpanan energi secara lokal dapat merupakan pilihan yang lebih efisien.

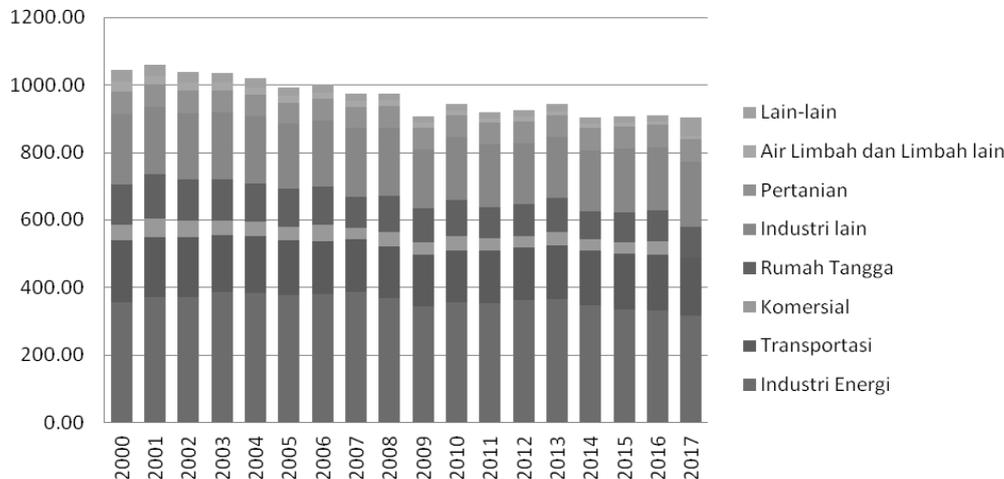
Di Jerman, dengan faktor kapasitas pembangkitan terbarukan yang hanya sekitar 30 persen dari pembangkit listrik terbarukan dan adanya insentif yang diberikan pemerintah bagi masyarakat yang membangun pembangkit energi mandiri telah menyebabkan ekspansi pembangkitan listrik terbarukan dengan sangat masif. Pada saat tertentu, harga energi dapat bernilai negatif, yaitu saat negara bahkan membayar mereka yang menggunakan listrik. Harga pembangkitan yang lebih tinggi dari harga jual listrik juga mengakibatkan pemerintah Jerman harus memberikan subsidi dan jumlahnya kian membengkak. Beban ini

oleh pemerintah sebagiannya harus dibebankan ke perusahaan pembangkit listrik (*utility*) dan pada akhirnya kemudian ke konsumen.

Usaha lain yang ditempuh oleh pemerintah Jerman untuk mencapai tujuan *Energiewende* adalah dengan menurunkan konsumsi energi. Usaha ini merupakan bagian penting dari transisi energi di Jerman, selain penggunaan energi terbarukan. Dari segi konsumsi energi, sejak 2008 secara rata-rata memang terdapat penurunan sebesar 0,8% per tahun (**Gambar 5**)[11]. Meskipun demikian nampaknya target konsumsi energi tahun 2020 akan sulit dicapai karena diperlukan penurunan konsumsi sebesar 5,25% per tahun sehingga diperlukan usaha yang jauh lebih besar lagi untuk mencapai target yang diharapkan.



Gambar 5. Konsumsi energi primer di Jerman (dalam Petajoule)



Gambar 6. Emisi GRK (juta ton ekuivalen CO<sub>2</sub>) tahun 2000-2017

Menurut Kementerian Lingkungan Hidup Federal Jerman (*Umweltbundesamt*), data emisi GRK (**Gambar 6**)[12] menunjukkan adanya kecenderungan penurunan, tetapi apabila laju penurunannya masih seperti saat ini, maka target tahun 2020 yaitu ke tingkat 751 juta ton ekuivalen CO<sub>2</sub> akan sulit dicapai[13]. Emisi dari industri energi, transportasi dan industri lainnya yang merupakan komponen utama dan harus diturunkan secara signifikan. Mengingat Jerman adalah negara industri manufaktur yang maju dan sektor transportasinya yang masih mengandalkan bahan-bakar fosil, maka pengurangan konsumsi dalam sektor ini akan mengharuskan penggunaan energi listrik dari energi terbarukan dan penyimpanan energi yang jauh lebih besar lagi.

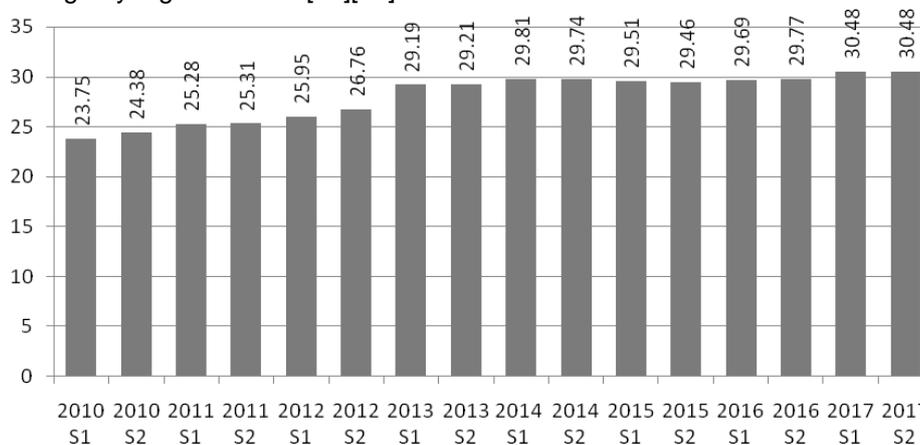
Dewasa ini Indonesia juga tengah mengembangkan energi terbarukan antara lain melalui pembangunan PLTB tahap I dan II di Sidrap, yang masing-masing berkapasitas 50

MW serta PLTB Jeneponto, seluruhnya di Sulawesi Selatan, dengan kapasitas 60 MW dan biaya investasi sebesar 150 juta USD. Tidak didapatkan keterangan apakah biaya ini termasuk biaya pengembangan jaringan listrik atau belum. Dengan kecepatan angin rata-rata sekitar 7,5 hingga 8 m/detik PLTB ini rata-rata akan memproduksi 198,6 Gigawatt-jam (GWh) per tahun atau dengan faktor kapasitas sebesar 43,5%. Harga jual listrik dari Pembangkit ini disepakati sesuai dengan Peraturan Menteri (Permen) ESDM Nomor 50 Tahun 2017 tentang Pemanfaatan Sumber Energi Terbarukan Untuk Penyediaan Tenaga Listrik, yaitu dibawah 85% dari Biaya Pokok Penyediaan Pembangkitan (BPP) Wilayah Sulawesi Selatan, Sulawesi Tenggara, dan Sulawesi Barat (Sulselrabar) yang sebesar 8,10 sen Dolar AS per kWh [10].

Kementerian ESDM telah menerbitkan Peraturan Menteri ESDM No. 50/2017 yang merevisi Peraturan Menteri ESDM No. 12/2017, yang membuka peluang dan mendorong investor dan pengembang EBT untuk berinvestasi di zona-zona krisis listrik, seperti NTT, NTB dan Maluku, dengan memberikan harga yang lebih tinggi lagi untuk menarik minat investor (sekitar 14-20 sen USD per kWh). Peraturan ini dikatakan akan membuka peluang untuk kompetisi sehat antar pengembang dengan melakukan pemilihan langsung yang dapat menekan harga jual-beli listrik dengan PT PLN agar tidak membebani PT PLN maupun rakyat dan memberikan daya tarik terhadap investor [14].

Subsidi listrik dalam Anggaran Pendapatan dan Belanja Negara/APBN 2018, telah dipatok Rp 47,66 triliun. Selain itu ada juga tambahan atas subsidi yang belum terbayarkan tahun lalu yang akan dibayar tahun ini (*carry over*) sebesar Rp 5 triliun. Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan Kementerian ESDM menyebutkan pula bahwa tambahan satu juta pelanggan listrik akan meningkatkan subsidi sekitar Rp. 4 triliun hingga Rp. 5 triliun. Peraturan Pemerintah No. 79 tahun 2018 tentang Kebijakan Energi Nasional pada pasal 11 ayat 2 telah memberikan batasan bahwa penggunaan energi terbarukan harus memperhatikan tingkat keekonomian sehingga pemanfaatannya tidak semakin membebani subsidi.

Di Jerman biaya yang besar diperlukan untuk biaya pembangkitan dan transmisi dari sumber listrik terbarukan yang berada di lepas pantai di sebelah utara Jerman ke wilayah industri di bagian selatan. Selain itu, banyaknya jumlah pembangkit dan lokasinya yang tersebar memerlukan sistem pengaturan beban yang canggih dan untuk itu diperlukan biaya pengembangan yang tidak kecil [15][16].

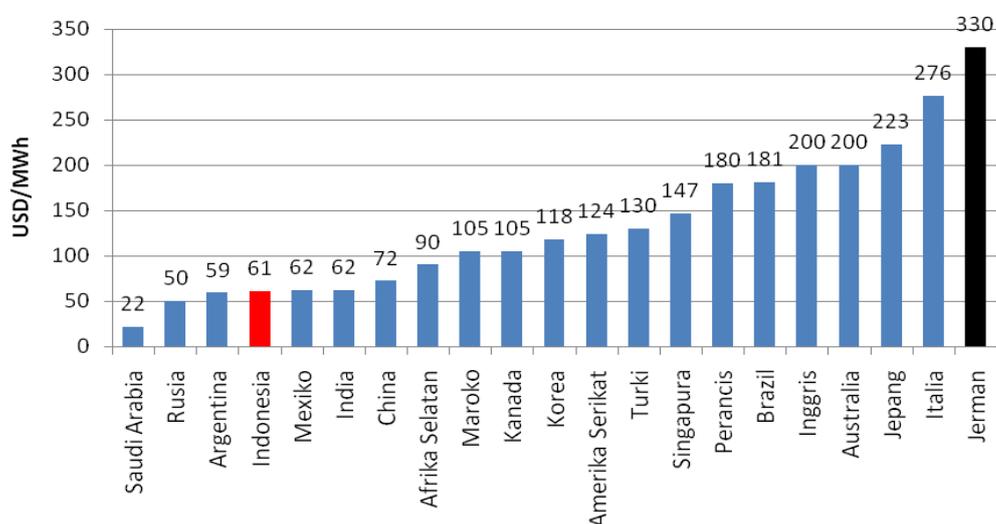


Gambar 7. Harga listrik di Jerman periode 2010-2017 (per semester, dalam sen Euro/kWh)

Data harga listrik untuk pengguna rumah tangga di Jerman per semester dari tahun 2010 hingga 2017 memiliki kecenderungan untuk terus naik diberikan dalam **Gambar 7**[11]. Pada paruh pertama 2016, rerata harga listrik rumah tangga adalah 29.69 sen Euro per kWh atau sekitar 34,58 sen Dolar per kWh dan pada tahun 2017 naik menjadi 30,46 sen Euro per kWh atau sekitar 35,48 sen Dolar per kWh [9, Statista]. Bahkan bila dibandingkan dengan harga listrik tahun 1990, harga listrik dewasa ini telah mencapai dua kali lipat. Harga listrik tersebut mengandung beberapa komponen seperti *surcharge* (*fee* atau biaya tambahan) seperti dimandatkan oleh EEG (*Erneuerbare Energien Gesetz*, Undang-undang Sumber Energi Terbarukan). Karena harga listrik terbarukan yang relatif mahal, maka ekspansinya

akan menyebabkan harga listrik menjadi lebih tinggi bila dibandingkan dengan negara-negara lain yang programnya tidak terlalu ambisius seperti Jerman. Gambar menunjukkan perbandingan harga listrik di beberapa negara yang juga mengembangkan energi terbarukan.

Subsidi terhadap energi terbarukan diberikan dengan bentuk biaya atau *surcharge* terhadap konsumsi listrik per kWh. Pada tahun 2000, biaya ini hanya 0,2 sen Euro/kWh [4]. Pada bulan Oktober 2012, Jerman mengumumkan penambahan biaya energi terbarukan yang diberlakukan pada tahun 2013 kepada konsumen rumah tangga dari 3,6 sen Euro menjadi 5,5 sen Euro per kWh atau meningkat sekitar 47%. Di sisi lain, sekitar 250 konsumen energi terbesar (swasta dan milik negara) justru dikecualikan dari penambahan biaya ini. Hal ini menimbulkan pertanyaan tentang bagaimana membagi biaya akibat penggunaan energi terbarukan ini kepada konsumen rumah tangga, industri kecil, menengah dan besar [13]. Menurut Badan Energi Internasional (IEA), harga listrik di Jerman saat ini mencapai 30 sen per kWh atau dua kali lipat harga listrik di Perancis dan sekitar 40% lebih tinggi dibandingkan negara-negara maju lainnya seperti pada Gambar 5 dibawah ini. Bandingkan dengan harga jual listrik di Indonesia yang hanya berkisar 6 sen Dolar AS[20].



Gambar 8. Harga listrik di beberapa negara (2016, sen Dolar)

Jerman dan Indonesia telah mencanangkan target yang optimistik dalam program reduksi emisi CO<sub>2</sub>. Indonesia juga sedang semangat mengembangkan program energi terbarukan. Agar tidak terjebak dalam permasalahan harga energi dan subsidi, ada beberapa hal yang dapat menjadi pertimbangan para pengambil keputusan.

Pemanfaatan energi terbarukan yang memiliki fluktuasi alamiah (*intermitent*) seperti energi bayu dan surya memerlukan sistem penyimpanan energi seperti *pumped storage* atau sejenisnya untuk mengkompensasi kelebihan dan kekurangan pasokan dan secara rata-rata kapasitas dari pembangkit jenis ini adalah sekitar 30%. Apabila penyimpanan tidak tersedia, maka diperlukan cadangan pasokan energi dari sumber lain termasuk sumber konvensional seperti batubara dalam kasus di Jerman. Penting untuk diperhatikan bahwa sumber cadangan tersebut haruslah memiliki emisi karbon rendah agar target reduksi emisi CO<sub>2</sub> tetap dapat dicapai.

Fluktuasi alamiah pembangkit terbarukan memerlukan sistem prediksi beban dan jaringan yang mutakhir dan handal agar stabilitas dan mutu pasokan listrik dapat terjaga dan pembangkit cadangan sebaiknya memiliki kemampuan sebagai *load follower*. Pengembangan jaringan cerdas (*smart-grid*) di seluruh Eropa diprediksi akan memerlukan dana antara 100 hingga 400 milyar Euro [17]. Faktor harga listrik harus pula dipertimbangkan untuk mengatasi permasalahan subsidi, utamanya karena Indonesia masih menganut rezim subsidi dan jumlah pelanggan listrik akan terus meningkat sejalan dengan pertumbuhan penduduk, kemajuan teknologi, pertumbuhan industri, dan sebagainya. Di Indonesia, Kementerian ESDM mengatakan bahwa pengembangan EBT untuk mencapai

target proporsi bauran energi sebesar 23% pada tahun 2030 akan memerlukan dana sebesar 1.600 Trilyun Rupiah [18].

Biaya penelitian yang sangat besar telah pula dialokasikan oleh pemerintah Jerman dalam kerangka program transisi energi tersebut. Pada tahun 2016 saja, biaya yang dikeluarkan mencapai sekitar 700 juta Euro, atau sekitar 10 trilyun rupiah, untuk penelitian mengenai energi terbarukan dan efisiensi energi saja. Jika Indonesia menginginkan harga energi yang kompetitif, maka kandungan lokal dalam pengembangan energi terbarukan juga harus tinggi. Apabila tidak, maka Indonesia hanya akan menjadi pasar bagi industri energi terbarukan.

Sebenarnya program ini dianggap berhasil dari aspek penerapan penggunaan energi terbarukan untuk menggantikan sumber-sumber energi konvensional. Meskipun demikian, penjelasan mengenai keuntungan ekonomi yang didapatkan masih sulit untuk didapatkan. Meskipun harga listrik cenderung naik, program ini sangat didukung oleh masyarakat di Jerman sehingga apapun kendala yang dihadapi berupa kenaikan harga listrik dan meningkatnya subsidi pemerintah, program ini dapat terus berjalan. Namun demikian, Uni Eropa memberikan catatan mengenai beberapa hal yang dapat menghambat kebijakan ini yaitu:

1. Biaya keseluruhan dari program transisi energi
2. Meningkat pesatnya harga listrik karena abonemen (*surchage*) EEG<sup>1</sup> terhadap moda pembangkitan terbarukan
3. Digantinya energi batubara dan nuklir di Jerman telah menyebabkan hilangnya lapangan kerja di sektor energi konvensional
4. Naiknya harga listrik dapat meruntuhkan dukungan publik
5. Kapasitas infrastruktur grid dan digitalisasi transmisi energi
6. Teknologi penyimpanan energi

## KESIMPULAN

Penggunaan energi terbarukan di Indonesia sangat diperlukan untuk mengatasi kekurangan pasokan, memanfaatkan sumberdaya alam yang cukup melimpah, diversifikasi energi serta reduksi emisi GRK. Tetapi perlu diperhatikan bahwa penggunaan energi terbarukan memerlukan sistem kelistrikan dan pengaturan beban yang canggih untuk mengatasi masalah fluktuasi alamiahnya. Semakin masif penggunaan energi jenis ini, diperlukan pula kemampuan prediksi beban listrik yang lebih baik untuk menghindari ketidakstabilan pasokan. Apabila tidak dimungkinkan transfer energi ke dan dari daerah lain, maka penyimpanan kelebihan pasokan energi secara lokal mutlak diperlukan.

Penyimpanan energi secara masif selain *pumped storage* saat ini masih dalam tahap penelitian dan pengembangan, termasuk teknologi garam cair dan elektrokimia. Apabila penyimpanan energi tidak tersedia, maka untuk mengatasi fluktuasi alamiah diperlukan pembangkit listrik konvensional lainnya seperti batubara, gas, atau pembangkit jenis lain. Tetapi harus diperhatikan bahwa pembangkit listrik tersebut sebaiknya memiliki luaran CO<sub>2</sub> yang kecil untuk mencapai target pengurangan emisi.

Harga produksi listrik energi terbarukan saat ini masih tinggi meskipun memiliki kecenderungan untuk terus turun. Mengingat tarif listrik di Indonesia masih menganut rezim subsidi maka penggunaan energi terbarukan dapat membawa konsekuensi pembengkakan subsidi. Subsidi ini diperlukan agar tarif listrik tetap rendah, minat swasta untuk membangun pembangkit listrik tetap ada, dan daya beli masyarakat golongan menengah ke bawah dapat terjaga.

Bila mempertimbangkan daya dukung lingkungan terhadap emisi karbon maka sudah selayaknya pemerintah Indonesia cermat dalam melakukan "transisi energi" ke moda energi terbarukan mengingat beberapa faktor penting diatas. Jangan sampai beban transisi energi tersebut pada akhirnya akan dipikul oleh konsumen listrik dan pada saat yang sama tujuan reduksi emisi GRK atau CO<sub>2</sub> tetap tidak tercapai.

Dana penelitian yang cukup harus dialokasikan antara lain untuk riset dibidang energi terbarukan, penyimpanan energi, peningkatan efisiensi energi, jaringan cerdas (*smart grid*), dan infrastruktur pendukung kelistrikan lainnya agar Indonesia dapat mengambil manfaat secara optimal dari program transisi energi dan tidak sekedar menjadi pasar produk energi terbarukan.

---

<sup>1</sup> *Erneuerbare Energien Gesetz*, Undang-undang Sumber Energi Terbarukan

Faktor lain yang perlu diperhatikan adalah bahwa “diskriminasi energi,” dimana satu jenis energi mendapatkan perlakuan sangat istimewa dan jenis energi lainnya hanya dijadikan alternatif terakhir harus dihilangkan karena semua jenis energi memiliki kelebihan dan kekurangan. Pemerintah harus obyektif dalam pengambilan keputusan dengan mempertimbangkan faktor teknis, ekonomi dan strategis.

Akhirnya, dukungan masyarakat terhadap program pemerintah dalam bidang energi juga mutlak diperlukan. Masyarakat harus diedukasi sehingga mereka mendapatkan pemahaman penuh mengenai, bukan saja manfaat jangka pendek, tetapi juga manfaat jangka panjang, dari program energi yang ada sehingga gejolak-gejolak yang timbul karena kenaikan harga energi, subsidi yang terus meningkat yang membebani anggaran negara tetap dapat diterima. Dari Jerman dapat dipelajari pula bahwa meskipun biaya yang harus ditanggung masyarakat tidak kecil, namun mereka tetap mendukung program tersebut karena besarnya dukungan politik yang kuat dari masyarakat.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pimpinan Pusat Kajian Sistem Energi Nuklir dan panitia Seminar Infrastruktur Energi Nuklir yang telah memberikan kesempatan dan mengizinkan keikutsertaan dalam seminar ini.

#### DAFTAR PUSTAKA

1. Sekretariat Jenderal Dewan Energi Nasional, “Outlook Energi Indonesia 2016”, Jakarta, (2016).
2. Kementerian Energi dan Sumberdaya Mineral, “Laporan Kinerja 2017”, Jakarta, (2018).
3. BASYIRAN, T.B., “Konsumsi Energi Listrik, Pertumbuhan Ekonomi dan Penduduk terhadap Emisi Gas Rumah Kaca Pembangkit Listrik di Indonesia”, Master Thesis, University of Tuebingen, (2014).
4. BUCHAN D., “The Energiewende – Germany’s gamble”, Oxford Institute for Energy Studies, Oxford, (2012).
5. Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi, “Outlook Energi Indonesia 2016”, Jakarta, (2018).
6. <https://www.energy-charts.de/climate.htm?source=windspeed&year=2018&month=8>, (diakses pada 1 September 2018).
7. [http://info.neces.com/nec\\_energy\\_solutions\\_jardelund-press-release](http://info.neces.com/nec_energy_solutions_jardelund-press-release)
8. <http://ebtke.esdm.go.id/post/2017/05/03/1650/peluncuran.peta.potensi.energi.angin.kerja.sama.indonesia-denmark.saatnya.gerak.nyata.kembangkan.pembangkit.energi.baru.terbarukan> (diakses pada 17 September 2018).
9. <http://windeis.anl.gov/guide/basics/>
10. <http://ebtke.esdm.go.id/post/2018/02/01/1872/selain.sidrap.berikut.pembangkit.listrik.tenaga.angin.yang.ditargetkan.segera.beroperasi> (diakses pada 12 Juli 2018).
11. Statista (diakses 27 Juli 2018)
12. <https://www.umweltbundesamt.de/en/> (diakses pada 12 Agustus 2018)
13. BEVERIDGE R., dan KERN K., “The ‘Energiewende’ in Germany: Background, Development and Future Challenges”, *Renewable Energy Law and Policy Review* 01/2013; 4(1): 3-12.
14. <https://www.kompasiana.com/cahyawardhani/599b018e5af02c1fad017cc2/pltb-tidak-layak-untuk-indonesia-ah-kata-siapa> (diakses pada 12 Juli 2018).
15. AGORE ENERGIEWENDE, “Understanding the Energiewende. FAQ on the ongoing transition of the German power system”, Berlin (2015)
16. KUITTINEN H., dan VELTE D., “Case Study Report Energiewende”, the European Commission, Brussels, 2018.
17. <https://www.technologyreview.com/s/601514/germany-runs-up-against-the-limits-of-renewables/> (diakses 27 Juli 2018).
18. <http://ebtke.esdm.go.id/post/2015/11/10/1005/pengembangan.energi.baru.terbarukan.butuh.rp.1600.triliun> (diakses pada 17 September 2018).
19. <https://www.dw.com/en/german-issues-in-a-nutshell-energiewende/a-38869543> (diakses 27 Juli 2018).
20. International Energy Agency (IEA), “World Energy Prices. An Overview. 2018 Edition”, 2018

## PENGEMBANGAN REAKTOR DAYA EKSPERIMENTAL SEBAGAI UNIT UTILITAS PABRIK

Dedy Priambodo<sup>1</sup>

Pusat Kajian Sistem Energi Nuklir-BATAN Jl. Kuningan Barat, Mampang Prapatan, Jakarta Selatan,  
12710

email: dedypriambodo@batan.go.id

### ABSTRAK

**PENGEMBANGAN REAKTOR DAYA EKSPERIMENTAL SEBAGAI UNIT UTILITAS PABRIK.** Reaktor Daya eksperimental (RDE) adalah program unggulan BATAN sebagai langkah awal desain reaktor masa depan Indonesia. RDE sebagai reaktor eksperimental didesain untuk dapat memproduksi listrik dan panas untuk proses industri. Makalah ini bertujuan sebagai salah satu acuan untuk pengembangan RDE ke arah komersial. Model industri yang diambil pada studi ini adalah unit utilitas di Pabrik Pupuk Kalimantan Timur (PKT) atau yang disebut Pabrik 6. Studi dimulai dengan identifikasi kebutuhan utilitas yang dipasok oleh Pabrik 6 kemudian disimulasikan pada sistem RDE. Dari studi ini diperoleh kebutuhan utilitas yang dipasok Pabrik 6 adalah uap tekanan tinggi 500°C/85bar sebanyak 131 kg/s dan listrik sebesar 60 MWe. Kebutuhan tersebut dapat dipenuhi dengan menaikkan daya reaktor RDE menjadi 550MWt dan tekanan keluar *steam generator* menjadi 85 bar serta membuat *tie in* untuk mencerat sebagai uap tekanan tinggi dari keluaran *steam generator*.

Kata kunci: RDE, utilitas, listrik, panas.

### ABSTRACT

**DEVELOPMENT OF EXPERIMENTAL POWER REACTORS AS A UTILITY UNIT.** The experimental Power Reactor (RDE) is BATAN's flagship program as an initial step in Indonesia's future reactor design. RDE as an experimental reactor is designed to be able to produce electricity and heat for industrial processes. This paper aims to serve as a reference for the commercial development of RDE. The industrial model taken in this study was a utility unit at the East Kalimantan Fertilizer Factory (PKT) or called Factory 6. The study began with the identification of utility needs supplied by Factory 6 and then simulated on the RDE system. From this study, the utility requirements supplied by Factory 6 are high pressure steam 500°C / 85bar, 131 kg / s and electricity of 60 MWe. This need can be fulfilled by increasing the RDE reactor power to 550MWt and the output pressure of the steam generator to 85 bar and also creating a tie in to extract high pressure steam from the steam generator outlet line.

Keyword: RDE, Utility, electricity, heat,

### PENDAHULUAN

Reaktor Daya Eksperimental (RDE) merupakan program unggulan BATAN untuk mempromosikan penggunaan energi nuklir, meningkatkan penerimaan masyarakat terhadap energi nuklir, membuktikan kehandalan system keselamatan dari teknologi reaktor maju, menguasai teknologi reaktor generasi IV dan mendorong kemampuan industri nuklir nasional. RDE menggunakan reaktor gas temperature tinggi (*High Temperature Gas Cooled Reactor-HTGR*) dengan kapasitas panas sebesar 10 MW<sub>th</sub>, menggunakan bahan bakar tipe bola (*pebble*), pendingin gas helium dan unit konversi daya tak langsung dengan siklus *Steam*[1]–[5]. Pemilihan HTGR sebagai teknologi untuk RDE juga dimaksudkan untuk unjuk kemampuan reaktor melakukan kogenerasi sehingga kedepan BATAN atau Indonesia pada umumnya dapat mendesain dan memproduksi sendiri PLTN HTGR yang mampu untuk menyokong kebutuhan listrik nasional maupun listrik dan panas untuk industri.

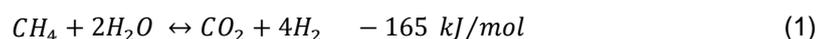
Pemanfaatan PLTN HTGR untuk industri di Indonesia harus diidentifikasi segera, sehingga arah komersialisasi RDE menjadi lebih terarah terkait daya dan kualitas *Steam*-nya. Dalam sektor industri itu sendiri, terdapat beberapa industri yang dinilai paling padat menggunakan energi, baik yang digunakan sebagai bahan bakar ataupun yang digunakan sebagai bahan baku. Diantara industry tersebut adalah industri baja, industri semen, industri pupuk, industri keramik, industri pulp dan kertas, industri tekstil dan industri pengolahan kelapa sawit. Jika dibandingkan dengan faktor input yang lain, biaya energi pada tujuh (7)

industri tersebut bahkan lebih besar dari biaya tenaga kerja, serta menempati peringkat kedua setelah biaya bahan baku [6].

Studi terkait kogenerasi nuklir sudah banyak dilakukan baik secara teknis maupun ekonomi [7]–[15]. Namun demikian, pada studi sebelumnya peneliti lebih berkonsentrasi pada kogenerasi nuklir secara parsial. Beberapa peneliti lebih berkonsentrasi pada kogenerasi nuklir dengan fasilitas desalinasi [8], [16]–[20], kogenerasi nuklir-produksi hidrogen [10], [15], [21]–[25]. Sementara studi kogenerasi nuklir yang komprehensif yang mencakup keseluruhan kebutuhan energi untuk menjalankan suatu industri masih belum dilakukan. Melihat kebutuhan studi untuk pengembangan komersialisasi RDE kogenerasi dan fakta terkait adanya industri yang sangat padat menggunakan energi di Indonesia maka studi ini bertujuan untuk identifikasi kebutuhan energi total suatu industri. Hasil studi ini bisa dijadikan acuan dalam pengembangan komersialisasi RDE.

### PEMILIHAN INDUSTRI SEBAGAI MODEL KOGENERASI NUKLIR

Pada studi ini industri yang digunakan sebagai model untuk kogenerasi adalah Industri Pupuk Urea. Industri ini dipilih sebagai model karena termasuk dalam industri yang padat konsumsi energi dan juga industri pupuk menggunakan sumber energi yaitu gas alam, sebagai bahan bakar sekaligus sebagai bahan baku [26]–[28]. Gas alam sebagai bahan baku digunakan sebagai sumber hidrogen pada unit ammonia khususnya pada komponen *Primary reformer* (PR) untuk memproduksi gas sintesis melalui proses endotermis *Steam Methane Reforming-SMR*. Reaksi SMR dapat dilihat pada persamaan (1). Sedangkan gas alam sebagai bahan bakar digunakan sebagai pemasok panas reaksi SMR pada PR.



Gas alam umumnya juga berfungsi sebagai bahan bakar pembangkit listrik dan *Steam* pada unit utilitas pada pabrik pupuk [29], [30].

Salah satu kompleks industri pupuk di Indonesia adalah Pupuk Kalimantan Timur (PKT). PKT baru saja mempunyai pabrik pupuk terbesar (Pabrik Kaltim 5) di Asia pasifik sekaligus menjadikannya kompleks pabrik pupuk terbesar di Asia [31]. Hingga saat ini, PKT mengoperasikan 5 (lima) pabrik pupuk yaitu Pabrik 1, Pabrik 2, Pabrik 3, Pabrik 4 dan Pabrik 5. Masing-masing pabrik terdiri dari unit ammonia, unit urea dan unit utilitas. Unit ammonia adalah unit yang bertugas memproduksi ammonia dari gas sintesis dan udara. Sedangkan Unit Urea adalah unit yang bertugas memproduksi urea dari ammonia dan karbon dioksida. Karbon dioksida merupakan hasil samping dari pemurnian ammonia pada unit ammonia. Sementara Unit Utilitas adalah unit pendukung operasional pabrik yang bertugas memproduksi listrik, *Steam*, air dan udara tekan. Kapasitas produksi ammonia dan urea masing-masing pabrik dapat dilihat pada Tabel 1. Gambaran umum industri pupuk dapat dilihat pada Gambar 1.

Tabel 1. Kapaitas Produksi PKT

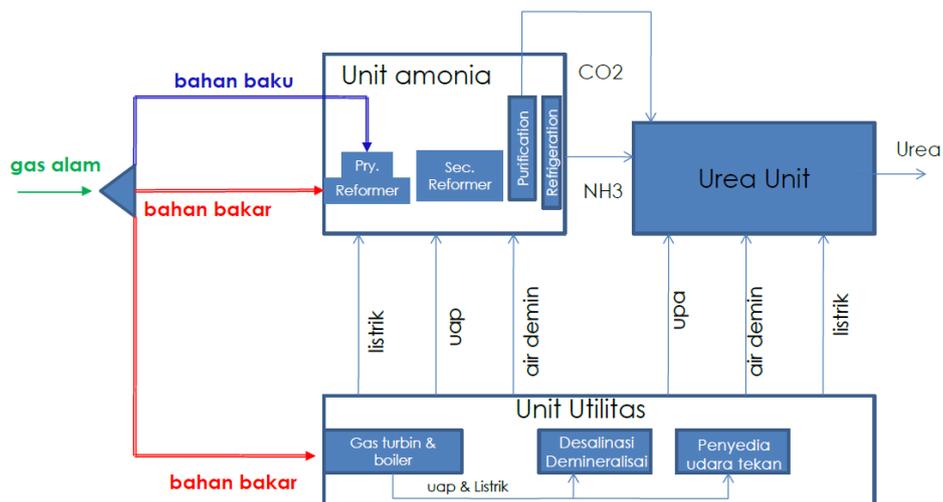
Pabrik	Produksi Amonia (ton/thn)	Produksi Urea (ton/thn)
Pabrik 1A	660.000	570.000
Pabrik 2	595.000	570.000
Pabrik 3	330.000	570.000
Pabrik 4	330.000	570.000
Pabrik 5	825.000	1.150.000
Total Produksi	2.740.000	3.430.000

Bersamaan dengan proyek Kaltim 5 telah dioperasikan juga Pabrik 6 yaitu *Boiler* Batubara yang berfungsi untuk menggantikan boiler eksisting berbahan bakar gas, yaitu boiler yang berada di Pabrik 1, Pabrik 2, dan Pabrik 4. Unit boiler batubara di Pabrik 6 PT. Pupuk Kalimantan Timur dibangun sejak 26 Januari 2010, dan pertama beroperasi pada 26 Desember 2012. Kedua unit boiler berjenis *Circulating Fluidized Bed Boiler* yang mana *boiler* batubara didesain untuk mampu menghasilkan *steam* dengan jumlah produk 262 ton/jam pada rate 100%. Sebagian besar *steam* yang dihasilkan oleh *boiler* batubara dialirkan ke Pabrik 5, yaitu sebesar 331 ton/jam, dari total produksi kedua *boiler* mencapai 520 ton/jam jika dioperasikan 100%. Kualitas *steam* yang dihasilkan adalah *superheated steam* pada temperature 500°C

tekanan 85bar. Selain sebagai supply untuk Pabrik 5, *steam* hasil *boiler* batubara juga digunakan sebagai tenaga penggerak *Steam Turbine Generator (STG)* di Pabrik 1 dan Pabrik 5 dengan kapasitas 2x25MW dan penggerak peralatan proses lainnya. Sistem *steam* terintegrasi ke seluruh pabrik eksisting.

Hal yang menarik pada pengembangan PKT ini adalah gencarnya usaha penghematan penggunaan gas alam. Proyek kaltim 5 dan pembangunan pabrik 5 adalah salah satu usaha tersebut. Kaltim 5 dibangun dengan menggunakan lisensi proses *Kellogg Brown & Root (KBR) purifier* yang memungkinkan penghematan pembakaran gas alam pada PR karena temperatur keluar PR yang rendah sekitar 700°C dibandingkan dengan teknologi sebelumnya yang mencapai 950°C. Dengan kapasitas produksi Selain itu penggantian turbin gas dan packed boiler berbahan bakar gas alam dengan *boiler* batubara dan turbin *Steam* juga dimaksudkan untuk mengatasi ketergantungan penggunaan gas alam yang cenderung semakin mahal dan cadangannya semakin berkurang. Dengan adanya *boiler* batubara maka, unit utilitas masing-masing pabrik mendapatkan pasokan *Steam* dari Pabrik 6. Selain itu, usaha penghematan gas alam lainnya dengan mengganti system Desalinasi pada unit utilitas yang semula menggunakan teknologi termal seperti *Multiple Effect Desalination MED* menjadi teknologi *Reverse Osmosis RO* sehingga menekan penggunaan *Steam*.

Untuk itu studi ini akan menjaikaan PKT sebagai model untuk aplikasi panas pengembangan RDE. Hal ini sejalan dengan usaha penghematan gas alam yang dilakukan PKT dan konsep RDE yang selain untuk produksi listrik tapi juga untuk panas.



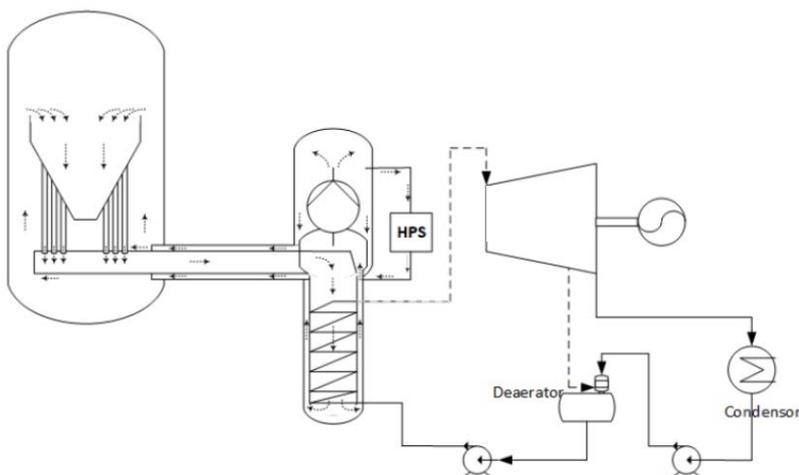
Gambar 1. Diagram blok Produksi Pupuk Urea

### SISTEM REAKTOR DAYA EKSPERIMENTAL

RDE menggunakan reaktor tipe HTGR berdaya 10MW<sub>th</sub> yang dikopel dengan unit konversi daya yang mampu membangkitkan listrik sebesar kurang lebih 3MW<sub>e</sub>. RDE menggunakan helium sebagai pendingin reaktor dan air/*Steam* sebagai fluida kerjanya. Pada prosesnya, helium masuk ke reaktor didorong oleh blower pada temperature 250 °C/30 bar kemudian mengambil panas reaksi fisi sehingga temperature naik menjadi 700 °C saat keluar reaktor. Helium masuk pada sisi *shell* pembangkit *Steam* kemudian bertukar panas dengan air sehingga temperature air naik dari 145 °C menjadi 520 °C dan berubah fasa menjadi *Steam* lewat jenuh pada tekanan 60 bar. *Steam* lewat jenuh ini dimanfaatkan untuk memutar turbin sehingga menghasilkan listrik sebesar 3MW<sub>e</sub>. *Steam* dari turbin dikondensasikan dalam kondensor kemudian dialirkan kembali ke pembangkit *Steam* dengan menggunakan dua tingkatan tekanan pompa; pompa tekanan rendah dan pompa tekanan tinggi. Sebelum masuk ke pembangkit *Steam*, air mengalami pemanasan awal di dalam *deaerator* sekaligus untuk menghilangkan oksigen terlarut. Kondisi operasi RDE dapat dilihat pada Tabel 2. Sementara diagram alir proses RDE dapat dilihat pada Gambar 2.

Tabel 2. Kondisi Operasi RDE [4]

Kapasitas Panas, MW <sub>th</sub>	10
Kondisi Pendingin primer-Helium	
- Temperatur keluar reactor, °C	700
- Temperatur masuk reactor, °C	250
- Tekanan operasi, bar	30
- Laju alir, kg/s	4,27
Kondisi Fluida kerja-Air/Steam	
- Temperatur Air umpan pembangkiti Steam, °C	145
- Temperatur Steam lewat jenuh, °C	520
- Tekanan Steam lewat jenuh, bar	60
- Laju alir, kg/s	3,57



Gambar 2. Diagram Alir RDE [5]

## HASIL DAN PEMBAHASAN PENGEMBANGAN RDE SEBAGAI UNIT UTILITAS

### a. Identifikasi pengembangan

Pengembangan RDE untuk Unit Utilitas suatu pabrik dimulai dari identifikasi kebutuhan utilitas di pabrik. Dengan diambilnya model PKT pada studi ini, maka kebutuhan listrik dan panas cukup diambil dari data Pabrik 6 Boiler batubara karena Pabrik 6 ini memasok semua kebutuhan listrik maupun Steam panas ke seluruh pabrik. Kebutuhan steam diambil dari kondisi steam keluar boiler (tekanan tinggi) hal ini dapat diterima karena kebutuhan steam tekanan menengah dan rendah diproduksi dari letdown steam tekanan tinggi.

Dari penjelasan di atas diketahui perbandingan kebutuhan, spesifikasi steam dan listrik yang harus dipasok oleh Pabrik 6 dengan produksi steam dan listrik dari RDE dapat dilihat pada Tabel 3

Tabel 3. Kapasitas Pabrik 6 dan RDE

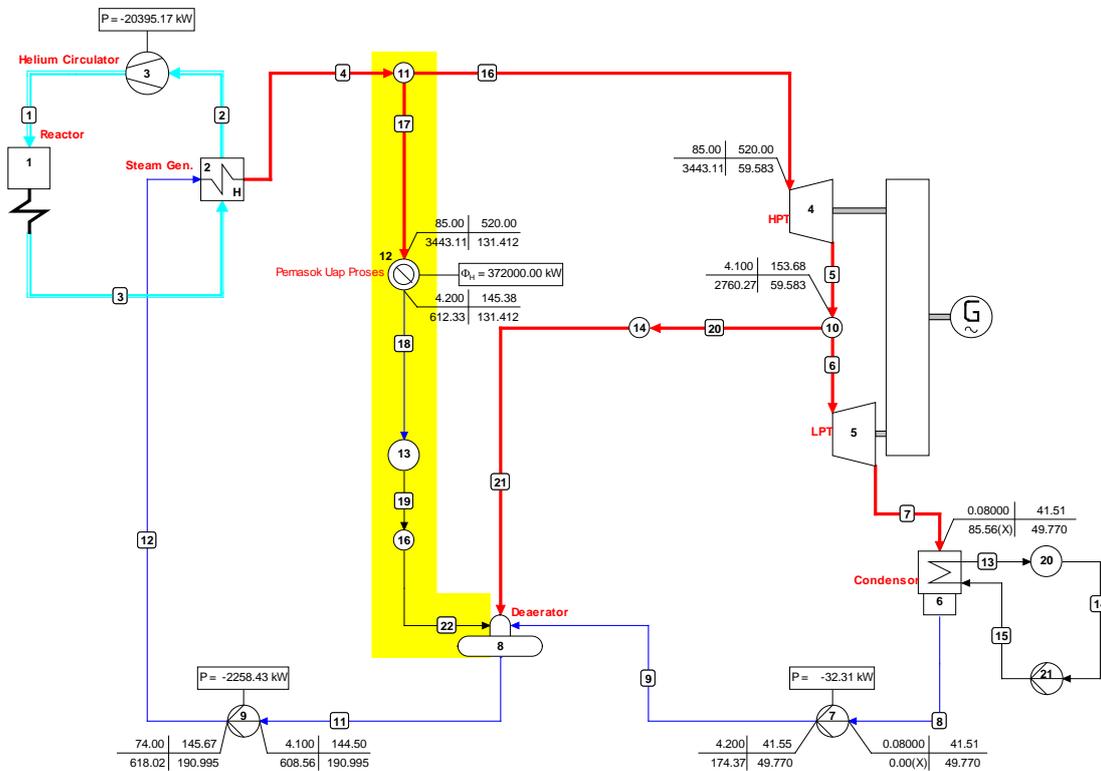
Spesifikasi	Fasilitas	
	Pabrik 6	RDE
Laju alir steam, ton/jam	520	12.9
Kondisi steam, °C/bar	500 / 85	520 / 60
Produksi listrik, MW	2 x 30	3

Dari Tabel 3 dapat dilihat bahwa terdapat perbedaan kapasitas Pabrik 6 dengan RDE sehingga dapat dilihat arah pengembangan/komersialisasi RDE sebagai unit utilitas pabrik pupuk. Arah pengembangan tersebut adalah pada laju alir, tekanan uap/steam dan produksi listrik. Kapasitas laju alir steam harus disediakan adalah 500 ton/jam≈131 kg/s kondisi 500°C/85bar dan listrik minimal 60 MWe (2x30).

Pada identifikasi ini hanya difokuskan pada uap proses, sedangkan panas reaksi belum dijadikan prioritas.

b. Sistem RDE untuk memenuhi kebutuhan uap panas dan listrik

Untuk memenuhi kebutuhan uap panas dan listrik seperti yang disediakan oleh Pabrik 6, maka kondisi operasi RDE harus menyesuaikan. Untuk mengetahui kondisi operasi RDE yang sesuai untuk memenuhi pasokan uap dan listrik dilakukan dengan simulasi dengan perangkat lunak *CycleTempo* dari TU Delf [32]. Simulasi dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Simulasi dengan CycleTempo

Simulasi dilakukan dengan membangun sebuah diagram dalam perangkat lunak *cycleTempo* urutan peralatan yang sesuai dengan kondisi RDE pada Gambar 2, kemudian melengkapi peralatan tersebut dengan parameter-parameter operasi sehingga memberikan kondisi operasi seperti dalam Tabel 2. Setelah itu dilakukan modifikasi pada diagram tersebut sehingga tersusun diagram RDE sebagai unit utilitas. Modifikasi yang dilakukan yaitu dengan menambahkan *tie in* pada aliran uap keluar *steam generator*, dan mengalirkannya pada sebuah *heat sink* yang dianalogikan sebagai pengguna uap panas, yang mana kondisi keluar pengguna panas ditetapkan sesuai dengan kondisi Deaerator. Kemudian parameter keluar turbin diubah sesuai dengan parameter Pabrik 6 sedangkan daya reaktor divariasikan hingga mendapatkan laju alir uap sebesar  $\pm 131$  kg/s dan daya listrik  $\pm 60$  MWe. Sebagai faktor keamanan, diambil *rule of thumb* daya listrik yang dibangkitkan setelah uap tekanan tinggi diambil pada sisi keluar *steam generator* harus minimal 30% dari daya maksimalnya.

c. Pemilihan daya reaktor

Dari hasil simulasi diketahui dengan kondisi operasi uap masuk pengguna uap panas 520°C/85bar dan kondisi keluarannya adalah 4,2bar, maka daya yang dikonsumsi pada pengguna panas sebesar 372MWt dengan laju alir uap 131,4 kg/s. Dengan demikian variasi daya reaktor dimulai dari 400MWt dan dinaikkan sebesar 50MWt untuk pengamatan produksi listrik yang dihasilkan dengan hasil seperti pada Tabel 4

Tabel 4. Produksi Listrik pada variasi daya reaktor dengan target penggunaan panas unit utilitas sebesar 372MWt

Daya Reaktor, MWt	Produksi Listrik, MWe	(b/a) %
-------------------	-----------------------	---------

	<i>Single purpose</i> (a)	Sebagai Unit Utilitas (b)	
400	132,2	14,0	10
450	148,7	30,6	21
500	165,2	47,1	28
550	181,8	63,6	35

Dari Tabel 4, diketahui bahwa daya reaktor yang diperlukan untuk menghasilkan uap dan listrik yang sesuai dengan Pabrik 6 adalah sebesar 550 MWt. Daya reaktor ini dipilih karena saat difungsikan sebagai Unit Utilitas dengan konsumsi panas 372MW mampu memproduksi listrik sebesar 63,6 MWe sehingga sesuai dengan kemampuan Pabrik 6. Selain itu, pada daya ini produksi listrik pada mode Unit Utilitas sebesar 35% dari mode *single purpose* sehingga memenuhi syarat yang ditentukan pada poin c.

## KESIMPULAN

RDE berpotensi untuk digunakan sebagai unit utilitas pada pabrik pupuk, dalam kasus ini adalah PKT. Hal ini dikarenakan RDE mampu memproduksi uap tekanan tinggi yang sesuai dengan spesifikasi Pabrik 6 PKT. Arah pengembangan RDE sebagai Unit Utilitas/Pabrik 6 dilakukan dengan menambah daya reaktor sebesar 550MWt dan memodifikasi sistem konversi daya dengan cara mencerat sebagaimana uap keluaran *steam generator* untuk memenuhi kebutuhan panas sebesar 372MWt.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Komisi Pembina Tenaga Fungsional Pusat Kajian Sistem Energi Nuklir yang telah membantu penyempurnaan tulisan ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Priambodo, E. Dewita, and I. D. Irianto, "Analisis Energi dan Eksergi Pada Sistem HTR-10 Siklus Turbin Uap," *J. Pengemb. Energi Nukl.*, vol. 17, no. JUNE, pp. 33–43, 2015.
- [2] Sriyono, R. Kusmastuti, S. Bakhri, and G. R. Sunaryo, "Analysis of helium purification system capability during water ingress accident in RDE," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 962, p. 012034, Feb. 2018.
- [3] M. Subekti, S. Bakhri, and G. R. Sunaryo, "The Simulator Development for RDE Reactor," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 962, p. 012054, Feb. 2018.
- [4] M. Pancoko, A. Nugroho, D. Priambodo, and T. Setiadipura, "Design study of a straight tube bundle steam generator for Reaktor Daya Eksperimental," *Int. J. Mech. Eng. Technol.*, vol. 9, no. 5, pp. 531–540, 2018.
- [5] D. Priambodo, M. Pancoko, Sriyono, and T. Setiadipura, "Design of Helium Purification System for Indonesia Experimental Power Reactor- Reaktor Daya Eksperimental," *Int. J. Mech. Eng. Technol.*, vol. 6, no. 7, pp. 1–7, 2018.
- [6] K. Perindustrian, *Perencanaan Kebutuhan Energi Sektor Industri Dalam Rangka Akselerasi Industrialisasi*. Jakarta, 2012.
- [7] M. D. Birmano and R. F. S. Budi, "Kajian peluang kogenerasi nuklir pada reaktor daya eksperimental (RDE) di indonesia," in *PERTEMUAN DAN PRESENTASI ILMIAH PENELITIAN DASAR ILMU PENGETAHUAN DAN TEKNOLOGI NUKLIR*, 2017, no. November, pp. 418–428.
- [8] G. Locatelli, A. Fiordaliso, S. Boarin, and M. E. Ricotti, "Cogeneration: An option to facilitate load following in Small Modular Reactors," *Progress in Nuclear Energy*. 2017.
- [9] G. Alonso, R. Ramirez, E. Del Valle, and R. Castillo, "Process heat cogeneration using a high temperature reactor," *Nucl. Eng. Des.*, 2015.
- [10] O. A. Jianu, G. F. Naterer, and M. A. Rosen, "Hydrogen cogeneration with generation IV nuclear power plants," in *Handbook of Generation IV Nuclear Reactors*, 2016.
- [11] C. Luo, F. Zhao, and N. Zhang, "A novel nuclear combined power and cooling system integrating high temperature gas-cooled reactor with ammonia-water cycle," *Energy Convers. Manag.*, 2014.
- [12] U. Bossel, B. Eliasson, and G. Taylor, "The Future of the Hydrogen Economy: Bright or Bleak?," *Cogeneration and Competitive Power Journal*. 2003.
- [13] J. Carlsson, D. E. Shropshire, A. van Heek, and M. A. Fütterer, "Economic viability of

- small nuclear reactors in future European cogeneration markets," *Energy Policy*, 2012.
- [14] M. A. Rosen, "Energy, environmental, health and cost benefits of cogeneration from fossil fuels and nuclear energy using the electrical utility facilities of a province," *Energy Sustain. Dev.*, 2009.
- [15] D. Priambodo, E. Dewita, and S. Ariyanto, "Pra-Rancangan Primary Reformer Pada Pabrik Hidrogen yang Dikopel Dengan PLTN HTGR," *J. Pengemb. Energi Nukl.*, vol. Vol. 14 No. no. Desember 2012 1., pp. 95–106, 2012.
- [16] P. Asiedu-Boateng, E. H. K. Akaho, B. J. B. Nyarko, and S. Yamoah, "Modeling and simulation of cogeneration nuclear power plant for seawater desalination," *Nucl. Eng. Des.*, 2012.
- [17] G. Alonso, S. Vargas, E. Del Valle, and R. Ramirez, "Alternatives of seawater desalination using nuclear power," *Nucl. Eng. Des.*, 2012.
- [18] Y. H. Jung, Y. H. Jeong, J. Choi, A. F. Wibisono, J. I. Lee, and H. C. No, "Feasibility study of a small-sized nuclear heat-only plant dedicated to desalination in the UAE," *Desalination*, 2014.
- [19] D. T. Ingersoll, Z. J. Houghton, R. Bromm, and C. Desportes, "NuScale small modular reactor for Co-generation of electricity and water," *Desalination*, 2014.
- [20] B. M. Misra, "Seawater desalination using nuclear heat/electricity - Prospects and challenges," *Desalination*, 2007.
- [21] K. Verfondern, X. Yan, T. Nishihara, and H. J. Allelein, "Safety concept of nuclear cogeneration of hydrogen and electricity," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 11, pp. 7551–7559, 2017.
- [22] R. H. X. Yan, H. Noguchi, H. Sato, Y. Tachibana, K. Kunitomi, "A hybrid HTGR system producing electricity, hydrogen and such other products as water demanded in the Middle East," *Nucl. Eng. Des.*, vol. 271, pp. 20–29, May 2014.
- [23] H. Sato, H. Ohashi, S. Nakagawa, Y. Tachibana, and K. Kunitomi, "Safety design consideration for HTGR coupling with hydrogen production plant," *Prog. Nucl. Energy*, vol. 82, pp. 46–52, 2015.
- [24] X. L. Yan, S. Kasahara, Y. Tachibana, and K. Kunitomi, "Study of a nuclear energy supplied steelmaking system for near-term application," *Energy*, 2012.
- [25] A. Bredimas, "Results of a European industrial heat market analysis as a pre-requisite to evaluating the HTR market in Europe and elsewhere," *Nucl. Eng. Des.*, 2014.
- [26] J. C. Molburg and R. D. Doctor, "Hydrogen from Steam-Methane Reforming with CO<sub>2</sub> Capture," in *20th Annual International Pittsburgh Coal Conference*, 2003.
- [27] I. D. G. F. Naterer, O. Jaber, "Environmental Impact Comparison of Steam Methane Reformation and Thermochemical Processes of Hydrogen Production," in *18th World Hydrogen Energy Conference 2010 - WHEC 2010*, 2010, pp. 169–175.
- [28] S. Alimah and D. H. Salimy, "Analisis Pasokan Panas Pada Produksi Hidrogen Proses Steam Reforming Konvensional Dan Nuklir," *J. Pengemb. Energi Nukl.*, vol. 17, no. Juni, pp. 11–20, 2015.
- [29] D. H. Salimy, A. Energi, P. Nuklir, T. Tinggi, P. Pabrik, and P. Urea, "APLIKASI ENERGI PANAS NUKLIR TEMPERATUR TINGGI PADA PABRIK PUPUK UREA," pp. 65–73, 2012.
- [30] P. Baboo, "BRIEF DESCRIPTION OF AMMONIA & UREA PLANT WITH IMPLEMENTATION OF ENERGY SAVING SCHEME." National Fertilizers Ltd. India.
- [31] "Largest Fertilizer Plant in Asia-Pacific to Open in Bontang," 2018. [Online]. Available: <http://en.tempo.co/read/news/2015/06/15/056675056/Largest-Fertilizer-Plant-in-Asia-Pacific-to-Open-in-Bontang>.
- [32] D. U. of Technology, "CycleTempo 5.0 A program for thermodynamic modeling and optimization of energy conversion systems." Faculty of Mechanical, Maritime and Materials Engineering (3mE), Mekelweg 2, The Netherlands.

Halaman ini sengaja di kosongkan

**KELOMPOK B**

---

---

**LINGKUNGAN**

Halanan ini sengaja dikosongkan

## KAJIAN PROBABILISTIK DAMPAK KESEHATAN AKIBAT LEPASAN RADIONUKLIDA RSG-GAS

Sunarko<sup>1</sup>, Denissa B. Syahna<sup>1</sup>, Heni Susiati<sup>1</sup>, Slamet Suryanto<sup>1</sup>, Arif Yuniarto<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Pusat Kajian Sistem Energi Nuklir, BATAN, Jakarta, 12070

<sup>2</sup> Pusat Pendayagunaan Informasi dan Kawasan Strategis Nuklir

email: sunarko@batan.go.id

### ABSTRAK

**KAJIAN PROBABILISTIK DAMPAK KESEHATAN AKIBAT LEPASAN RADIONUKLIDA RSG-GAS.** Kajian dosis secara probabilistik terhadap lepasan zat radioaktif dalam kondisi kecelakaan dilakukan untuk Kawasan Nuklir Serpong (KNS) yang terletak di daerah Puspipstek Serpong, Kota Tangerang Selatan, Provinsi Banten. Suku sumber yang digunakan adalah hasil pemodelan inventori teras Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy (RSG-GAS). Sejumlah 23 isotop digunakan dalam simulasi dengan fraksi lepasan maksimum untuk mendapatkan nilai dosis konservatif. Distribusi penduduk disekitar kawasan Serpong diberikan hingga radius 5 km berdasarkan data hasil kajian tahun 2016. Data meteorologi dicuplik secara terstratifikasi dari pangkalan data pemantauan meteorologi di Kawasan Nuklir Serpong (KNS) berupa rekaman per jam pada periode Januari hingga Desember 2017. Hasil simulasi mengindikasikan bahwa dampak deterministik atau dampak awal pada satu hari pertama setelah kecelakaan tidak menunjukkan adanya risiko somatis berupa sakit hingga kematian. Dosis maksimum tercatat untuk paparan jangka pendek (1 hari) dan jangka panjang (50 tahun) masing-masing adalah  $6,36 \times 10^{-4}$  Sv dan  $8,18 \times 10^{-3}$  Sv pada jarak 150 meter dari reaktor.

Kata kunci: probabilistik, radionuklida, RSG-GAS, dampak, kesehatan.

### ABSTRACT

**PROBABILISTIC ANALYSIS OF HEALTH IMPACT FROM RADIONUCLIDE RELEASE OF RSG-GAS.** Probabilistic dose analysis from radionuclide release of an accident scenario is modelled around the Serpong Nuclear Complex in Puspipstek area in South Tangerang Regency of Banten Province. The source term is obtained from core inventory modelling of G.A. Siwabessy Multipurpose Reactor (RSG-GAS) consisting of 23 isotopes. Data of population distribution up to 5 km radius is obtained from 2016 data. Meteorological data are stratifically sampled from 1 year database (January to December of 2017) of hourly records from the KNS meteorological tower. Simulation results indicate that the incurred risk from 1 day period of exposure result in zero number of sickness and death. The maximum dose for short (1 day) and long term (50 years) exposures are approximately  $6,36 \times 10^{-4}$  Sv and  $8,18 \times 10^{-3}$  Sv. These doses are found at the closest calculated distance of 150 meters from the reactor.

Keyword: probabilistic, radionuclide, RSG-GAS, impact, health

### PENDAHULUAN

Kajian dosis radioaktif dan dampak kesehatan yang timbul sebagai akibat suatu kecelakaan nuklir dapat dilakukan menggunakan metode probabilistik ataupun deterministik. *Probabilistic Risk Assessment* (PRA) atau *Accident Consequences Assessment* (ACA) adalah sebuah proses yang dilakukan untuk mengetahui potensi konsekuensi yang timbul akibat lepasan radionuklida dengan mempertimbangkan sejumlah kondisi, khususnya kondisi suku-sumber dan kondisi dispersi, saat kecelakaan terjadi. Pasangan kondisi suku-sumber dan dispersi tersebut merupakan peristiwa yang dapat terjadi secara bersamaan dengan tingkat kebolehjadian tertentu.

Kecelakaan nuklir yang sampai berakibat pada relokasi penduduk secara umum memiliki kemungkinan sangat kecil. Kecelakaan semacam ini biasanya termasuk dalam kategori *Beyond Design Basis Accidents* (BDBA) 1. Jenis kecelakaan lain yang dengan derajat keparahan yang lebih kecil namun dengan kemungkinan kejadian lebih sering disebut dengan *Design Basis Accident* (DBA). Dalam tulisan ini, lepasan radioaktif dari skenario BDBA dimodelkan menggunakan satu skenario suku-sumber dan serangkaian data

meteorologi yang masing-masing dicuplik dari pangkalan data meteorologi berdurasi 1 tahun menggunakan data 2017-2018. Suku sumber dimaksud adalah hasil perhitungan inventori teras Reaktor Serba Guna – G.A. Siwabessi (RSG-GAS) yang berlokasi di dalam Kawasan Nuklir Serpong (KNS), Kota Tangerang Selatan, Provinsi Banten. Skenario lepasan konservatif digunakan yaitu dengan mengasumsikan bahwa semua inventory setelah reaktor beroperasi penuh selama 1 tahun terlepas ke lingkungan secara bersamaan dalam satu waktu (fraksi lepasan untuk semua radionuklida = 1). Evaluasi terhadap dampak kesehatan disajikan dalam jangka pendek dan jangka panjang dipandang perlu dilakukan mengingat KNS dewasa ini telah dikelilingi oleh perumahan penduduk dengan kepadatan yang cukup tinggi.

## PEMODELAN

Deskripsi tentang kode computer PC-COSYMA berikut ini mengikuti penjelasan yang diberikan oleh Jones dkk. (1996) dan Buku Manual Penggunaan PC-COSYMA45, kecuali dinyatakan sebaliknya. PC-COSYMA dikembangkan oleh National Radiological Protection Board (NRPB) dan Forschungszentrum Juelich (FZJ) untuk mengevaluasi dispersi zat radioaktif di daratan Eropa dalam kerangka program *Methods for Assessing the Radiological Impact of Accidents* (MARIA). COSYMA (*Code SYstem from MAria*) adalah paket perangkat lunak yang digunakan untuk mengkaji konsekuensi di sekitar tapak fasilitas nuklir akibat lepasan material radioaktif ke atmosfer. Kode computer ini berisi tiga sub-kode yang didesain untuk diterapkan dalam periode waktu dan jarak reseptor yang berbeda-beda. Kode *Near Early* (NE) digunakan untuk menghitung efek kesehatan jangka pendek dalam jarak dekat dari sumber. Kode *Near Late* (NL) digunakan untuk mengukur dampak kesehatan lanjut serta tindak pencegahannya dalam jarak pendek. Kode *Far Late* (FL) digunakan untuk mengukur efek kesehatan jangka panjang untuk jarak yang jauh dari sumber beserta cara pencegahannya. Kode NE dan NL digunakan oleh kode MUSEMET yang berbasis model kepulan Gaussian yang memungkinkan perubahan temporal kondisi meteorologi. Kode FL menggunakan model MESOS untuk mengakomodasi proses adveksi dan difusi pada jarak jauh. Kode NL digunakan oleh ISOLA, sebuah model untuk durasi lepasan sangat panjang yang bernilai kecil sehingga kemungkinan tidak diperlukan tindakan pencegahan. Dosis, dampak kesehatan jangka pendek dan jangka panjang dihitung berdasarkan model yang berasal dari Inggris, Amerika Serikat dan Republik Federal Jerman.

Input yang digunakan meliputi kecepatan deposisi untuk 5 grup isotop yaitu gas mulia, uap, aerosol serta iodine dalam bentuk unsur dan organik atau fase seperti aerosol. Data meteorologi yang diperlukan adalah data rekaman tiap jam untuk kecepatan dan arah angin, laju curah hujan dan kelas stabilitas atmosfer. Output dari kode ini antara lain berupa dosis, dampak terhadap kesehatan dan risikonya pada titik penerima tertentu beserta distribusi kebolejadiannya.

Kecepatan angin pada ketinggian  $z$  dihitung menggunakan formulasi  $U(z) = U_0(z/z_0)^p$  dengan parameter  $z_0$  sebagai tinggi pengukuran angin (acuan) dan  $p$  adalah indeks profil angin. Kekasaran permukaan  $\geq 1m$  digunakan sebagai asumsi dalam pemodelan ini dan nilai untuk parameter  $p$  untuk berbagai kondisi stabilitas atmosfer diberikan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Nilai parameter  $p$  untuk berbagai kategori stabilitas udara

Stabilitas atmosfer	A	B	C	D	E	F
$p$	0.07	0.13	0.21	0.34	0.44	0.44

Dampak kesehatan yang dievaluasi adalah penyakit yang dapat diderita karena paparan dalam jangka pendek termasuk diantaranya adalah gangguan fungsi paru, hipertiroid, kulit terbakar, katarak, dan keterbelakangan mental. Dampak yang dapat mengakibatkan kematian dalam jangka pendek meliputi sindroma paru, hematopoietik, gastrointestinal, kematian pada bayi dan kematian akibat kulit terbakar. Risiko  $R$  untuk dampak jangka pendek terhadap seseorang dihitung menggunakan fungsi bahaya  $H$  sebagai berikut:

$$R = 1 - e^{-H}$$

$$H = \ln 2 \times \left( \frac{D}{D_{50}} \right)^S$$

Parameter dosis  $D$  (Gy) adalah dosis yang diterima oleh organ tertentu pada periode tertentu pula,  $D_{50}$  (Gy) adalah dosis yang mengakibatkan dampak pada 50% populasi, dan  $S$  adalah parameter bentuk yang mencirikan hubungan antara dosis dan risiko. Untuk jumlah dosis yang sama, laju dosis yang lebih besar akan lebih efektif dalam menyebabkan timbulnya dampak kesehatan. PC COSYMA membagi iradiasi pada beberapa periode dan memberikan rasio ( $D/D_{50}$ ) sebagai:

$$\frac{D}{D_{50}} = \sum_i \frac{D^i}{D_{50}^i}$$

Dengan  $i$  menandakan periode ke- $i$  dan:

$$D_{50}^i = D_{\infty} + \frac{D_0}{X^i}$$

Parameter  $X^i$  adalah rerata laju dosis para periode  $i$ ,  $D_{\infty}$  adalah nilai untuk  $D_{50}$  pada laju dosis tinggi dan  $D_0$  adalah parameter dosis. Tidak terdapat nilai batas minimum (*threshold*) untuk dampak jangka pendek namun ketika nilai  $R$  lebih kecil dari 1% maka dosis diasumsikan berada dibawah batas minimum dan  $R$  bernilai nol.

Dampak jangka panjang disajikan untuk 11 jenis penyakit kanker dan dampak yang dapat diturunkan (hereditari) seperti kanker darah (leukemia), tulang, payudara, paru, lambung, usus besar, hati, pankreas, tiroid, kulit dan bagian tubuh lainnya. Risiko absolut (model aditif) diterapkan untuk leukemia dan permukaan tulang sedangkan risiko relatif (model multiplikatif) diterapkan untuk jenis dampak atau kanker lainnya. Risiko aditif mengasumsikan bahwa kematian akibat kanker yang diakibatkan oleh diterimanya dosis radiasi tertentu diberikan sebagai jumlah ekspekta kematian akibat kanker per tahun, disamping laju dasarnya (*underlying rate*) dalam populasi yang ada. Di sisi lain, risiko multiplikatif mengasumsikan bahwa ekspekta kematian diberikan sebagai suatu persentase dari laju kematian yang mendasarinya. Dampak jangka panjang dihitung menggunakan hubungan linier antara dosis dan risiko dengan tanpa batas minimum (*threshold*). Sebagai contoh dapat diberikan bahwa risiko dari dampak kesehatan jangka panjang oleh radiasi eksternal dari material yang terdeposisi diatas tanah diberikan sebagai:

$$r = SF \times \sum_k (AG(k) \times ARC(k))$$

Parameter  $k$  berfungsi mewakili jenis radionuklida tertentu,  $SF$  adalah faktor tapan (*shielding*) untuk radiasi eksternal dari material yang terdeposisi di atas tanah,  $AG$  adalah konsentrasi radionuklida terdeposisi ( $Bq m^{-2}$ ). Risiko kesehatan jangka panjang lainnya yang disebabkan oleh jalur paparan yang lain dihitung menggunakan formulasi yang serupa dengan persamaan diatas. Tetapan-tetapan yang digunakan dalam tulisan ini mengikuti rekomendasi ICRP-606.

## METODOLOGI

Data meteorologi dalam pemodelan diperoleh dari pemantauan di lokasi Kawasan Nuklir Serpong. Total durasi data adalah 1 tahun dalam rentang periode 2017-2018 dengan kelengkapan data yang sangat baik yaitu mencapai 98%. Parameter meteorologi yang diperlukan adalah kecepatan dan arah angin, stabilitas atmosfer, curah hujan dan ketinggian lapisan batas (*boundary layer*). Stabilitas atmosfer ditentukan melalui metode *lapse-rate*, yang menggunakan data temperatur pada dua ketinggian, yaitu 60 dan 10 meter.

Pemodelan dispersi secara probabilistik dilakukan dengan melakukan pencuplikan data terstratifikasi (*stratified sampling*) terhadap data meteorologi. Data meteorologi dikelompokkan dalam serangkaian kondisi atmosfer yang akan memberikan konsekuensi radiologik yang sama dan kemudian akan dipilih satu rangkaian dari setiap grup untuk dijalankan dalam simulasi[5]. Kriteria pengelompokan yang digunakan dalam tulisan ini mengikuti kriteria standar dalam PC-COSYMA.

Simulasi dilakukan untuk KNS dengan RSG-GAS sebagai pusat lepasan. Topografi diasumsikan datar karena PC-COSYMA belum mengakomodasi topografi jenis lainnya. Luasan penampang reaktor adalah  $40 \times 40$  m dengan ketinggian cerobong 25 meter. Durasi lepasan adalah 1 jam yang merupakan durasi minimum dari lepasan yang dapat dimodelkan dalam PC-COSYMA.

Daerah penelitian melingkupi radius 5 km dan dibagi dalam 7 lingkaran konsentris dan 16 sektor arah angin, masing-masing memiliki sudut 22,5 derajat. Titik lepasan diasumsikan berada pada tengah-tengah lingkaran konsentris yang memiliki jarak masing-masing 0,3, 0,5, 1, 2, 3, 4, dan 5 km. Sektor-sektor tersebut diberi nomor mengikuti arah jarum jam dimulai dari arah utara sebagai sektor pertama.

Kecepatan pengendapan (deposisi) yang digunakan dalam kondisi kering adalah nilai baku dalam PC-COSYMA sebagai berikut; aerosol:  $0.001 \text{ m det.}^{-1}$ ; iodine elemental:  $0.01 \text{ m det.}^{-1}$ ; iodine organik:  $5 \times 10^{-4} \text{ m det.}^{-1}$ . Tetapan pengendapan oleh karena hujan atau pencucian (*washout*) diberikan sebagai hubungan  $\lambda = a \times i^b$  dengan parameter *i* sebagai intensitas curah hujan dengan satuan  $\text{mm jam}^{-1}$ . Tetapan *a* dan indeks *b* menggunakan nilai baku sebagaimana tercantum dalam Tabel 2.

Tabel 2. Koefisien pengendapan

Kategori	Aerosol	Iodine elemental	Iodine organik
a	$8 \times 10^{-5}$	$8 \times 10^{-5}$	$8 \times 10^{-7}$
b	0.8	0.6	0.6

Suku-sumber yang digunakan dalam tulisan ini merupakan angka dari RSG-GAS yang berasal dari doumen LAK RSG sebagai berikut[...]:

Tabel 3. Estimasi suku-sumber

NO.	Parameter Jenis Nuklida	Jumlah Aktivitas Bq/tahun	NO.	Parameter Jenis Nuklida	Aktivitas Bq/tahun
1.	Kr-83m	5.99E+11	13.	I-131	5.33E+07
2.	Kr-85	5.70E+06	14.	I-132	3.37E+07
3.	Kr-85m	3.08E+12	15.	I-133	2.00E+08
4.	Kr-88	8.70E+12	16.	I-134	1.31E+06
5.	Xe-131m	6.33E+11	17.	I-135	2.09E+08
6.	Xe-133	3.64E+12	18.	Sr-89	5.96E+03
7.	Xe-133m	9.07E+12	19.	Sr-90	3.66E+01
8.	Xe-135	1.92E+12	20.	Y-90	1.23E+05
9.	Xe-135m	1.61E+07	21.	Y-91	6.40E+03
10.	Xe-138	1.54E+	22.	Zr-95	6.03E+03
11.	Br-82	4.40E+04	23.	Nb-95	1.18E+04
12.	Br-83	5.99E+05	24.	Ru-103	2.25E+05
			25.	Rh-103m	3.21E+04

Tabel 4. Fraksi lepasan untuk berbagai grup radionuklida

Category	Group 1 Xe-Kr	Group 2 iodine	Group 3 Cs-Rb	Group 4 Te-Sb	Group 5 Ba-Sr	Group 6 Ru <sup>(a)</sup>	Group 7 La <sup>(b)</sup>
RSG-GAS	1	1	1	1	1	1	1

Catatan: (a) termasuk Mo, Rh, Tc, Co, Ru

(b) termasuk Nd, Y, Ce, Pr, La, Nb, Am, Cm, Pu, Np, Zr

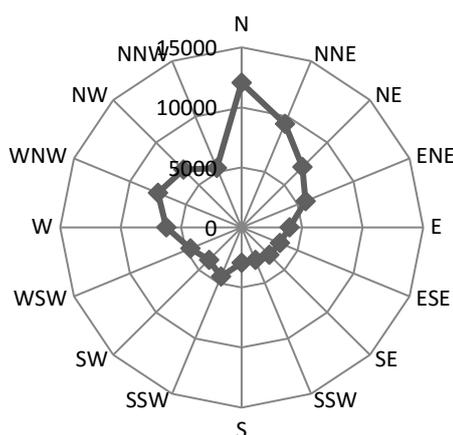
Dalam pemodelan ini tidak diterapkan retensi atau reduksi terhadap produk fisi. Seluruh fraksi radionuklida secara langsung terlepas ke lingkungan. Pemodelan juga mengasumsikan tidak ada tindakan intervensi/penanganan yang dilakukan sehingga akibat yang timbul merupakan nilai maksimum yang dapat terjadi. Isotop Br-82 dan Br-83 tidak dimodelkan karena tidak tersedia dalam daftar isotop standar dalam PC-COSYMA yang digunakan dalam penelitian ini. Asumsi ini tidak akan menimbulkan perbedaan besar dengan kondisi sebenarnya karena jumlah aktivitas yang relatif rendah bila dibandingkan dengan

krypton, xenon dan yodium yang merupakan kontributor dosis utama dengan hingga 7 orde lebih besar.

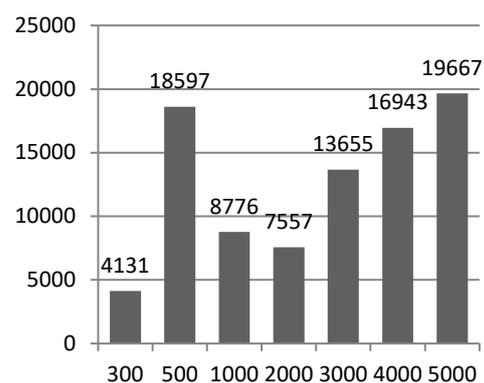
Ketinggian titik lepasan diasumsikan 25,0 meter dan dimensi bangunan reaktor untuk mengakomodasi *wake effect* adalah 40×40 meter. Input parameter lainnya diberikan seperti tercantum dalam Cao (2000)<sup>8</sup> atau apabila tidak ada, maka nilai standar dalam kode komputer akan digunakan. Parameter fraksi kontaminasi terhadap kulit adalah 10%; waktu integrasi untuk dosis kulit jangka panjang adalah 10.000 hari; waktu integrasi untuk dosis perorangan jangka pendek adalah 1 hari; waktu paruh zat radioaktif yang terdeposisi pada kulit adalah 30 hari; dan konsentrasi radioaktif yang terdeposisi di kulit diasumsikan bernilai sama dengan nilai terdeposisi di atas permukaan tanah.

Tabel 5. Sebaran penduduk hingga radius 5 km dari titik lepasan<sup>7</sup>.

Sektor	Arah	Radius Luar (meter)						
		300	500	1000	2000	3000	4000	5000
1	N	85	170	511	1532	4720	11293	13059
2	NNE	85	170	511	2201	5425	5326	9103
3	NE	85	170	511	1367	2466	4334	6879
4	ENE	85	170	511	1556	2490	3103	3535
5	E	46	92	276	884	1906	2784	2900
6	ESE	46	92	276	736	1308	3021	1708
7	SE	46	92	276	736	1640	1864	1994
8	SSW	46	92	276	954	1878	1818	648
9	S	46	92	276	1054	1678	972	1650
10	SSW	88	177	276	816	1126	2208	3277
11	SW	85	170	347	724	1126	1448	2099
12	WSW	85	170	456	2242	2073	1659	1378
13	W	85	170	456	2573	4002	2623	3327
14	WNW	85	170	912	2573	4002	4529	3597
15	NW	85	170	511	2235	4207	4185	3523
16	NNW	85	170	511	1559	2851	2060	3108



(a)



(b)

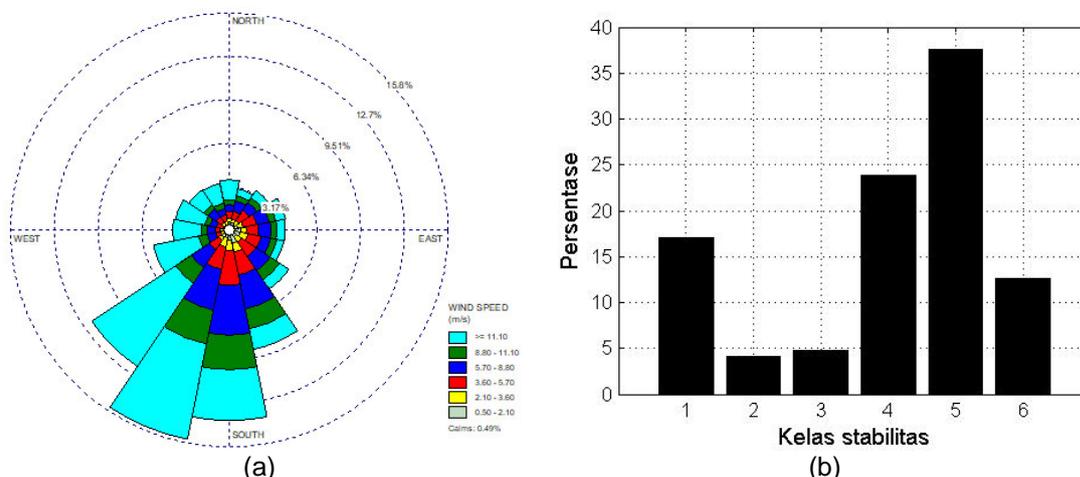
**Gambar 1. Jumlah kerapatan penduduk disekitar KNS (a) per sektor dan (b) per luasan cincin konsentris.**

Data distribusi populasi disekitar KNS diperoleh dari data Studi Tapak RDNK pada tahun 2016 di Kota Tangerang Selatan dan sekitarnya yang diekspresikan dalam 7 lingkaran konsentris dan 16 sektor seperti diberikan dalam Tabel 5. Secara sektoral, kepadatan

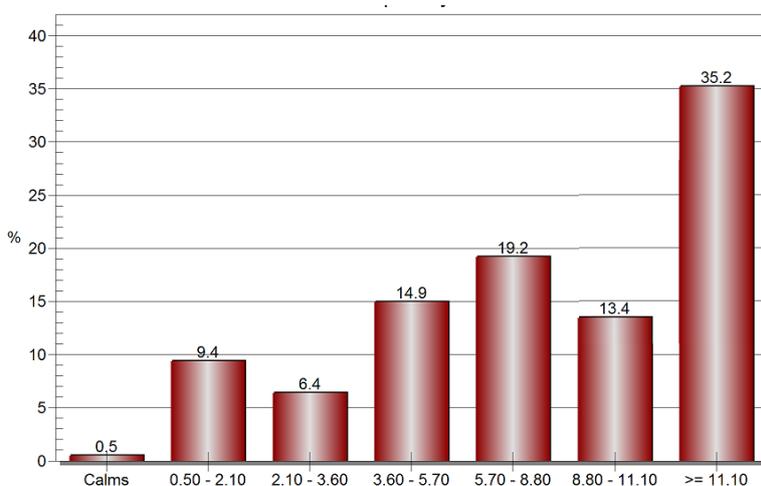
penduduk relatif besar dimulai dari sektor Barat dan melingkar searah jarum jam hingga arah Timur-Timur Laut relatif terhadap asumsi titik pusat lepasan di RSG-GAS dan jumlah dan kerapatan penduduk tertinggi ditemukan pada sektor 1 yang berada di sisi Utara RSG-GAS. Menurut jaraknya, kerapatan penduduk relatif tinggi (orang/km<sup>2</sup>) ditemukan pada ring 2, yaitu pada radius 300 hingga 500 meter dan pada radius lebih besar dari 3000 meter (Gambar 1 (a) dan (b)).

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

Rekaman data meteorologi pada ketinggian 10 meter menunjukkan bahwa angin terdistribusi hampir ke semua arah dalam 16 sektor dengan frekuensi tertinggi bertiup dari arah Selatan-Barat Daya. Kecepatan angin didominasi oleh kelas  $\geq 11,1$  m/detik dengan frekuensi 35,2%. Terdapat sedikit sekali kondisi angin *calm* pada hasil pemantauan (<0,5%). Kecepatan rata-rata angin pada ketinggian 10 meter adalah 1,13 m/s. Kondisi angin dapat diwakili oleh gambar windrose seperti diberikan dalam Gambar 3. Warna dalam gambar membedakan kelas-kelas kecepatan angin sementara arah dan panjang batang menggambarkan arah dari mana angin bertiup dan berapa persentasinya terhadap keseluruhan rekaman. Nol derajat berada pada arah Utara dan berputar searah jarum jam dan terbagi dalam 16 kelas arah.



**Gambar 2. Grafik (a) windrose in KNS (h=10 m), (b) distribusi stabilitas atmosfer: 1=sangat tidak stabil – 6=sangat stabil.**

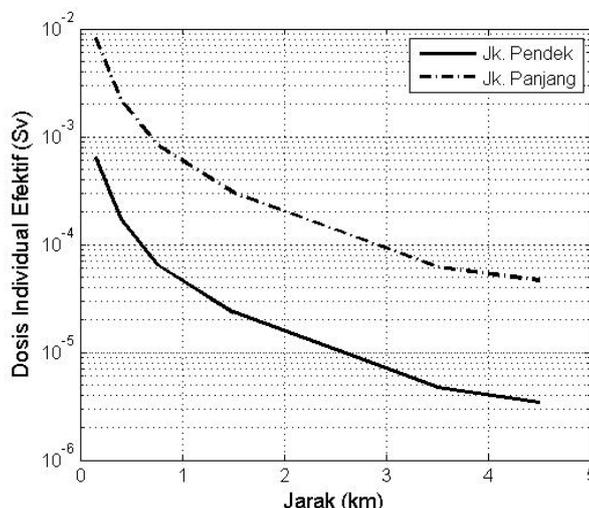


**Gambar 1. Distribusi kecepatan angin dan frekuensinya (%) (h=10 m).**

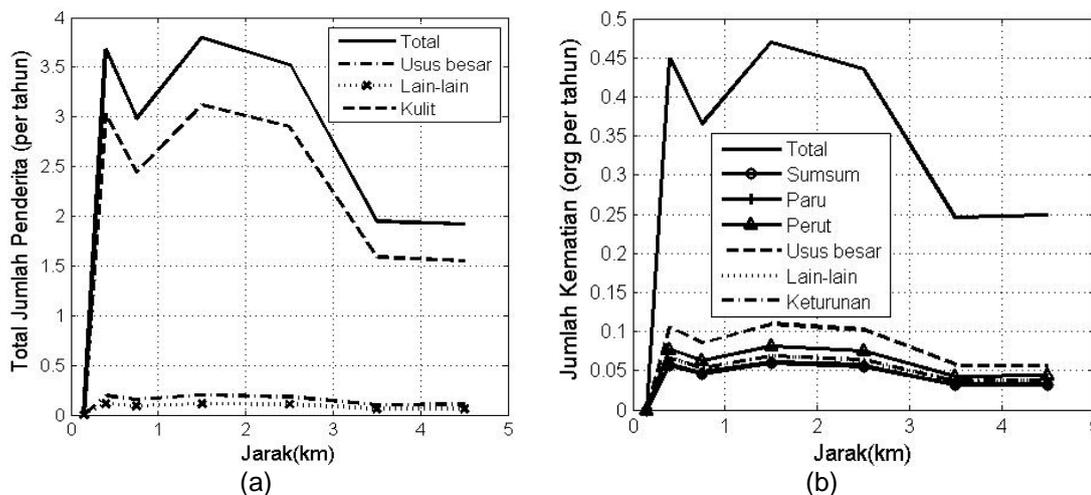
Dari windrose pada Gambar 2 (a) dapat diamati bahwa angin cenderung bertiup dari arah Selatan-Barat Daya, atau menuju ke daerah dengan kerapatan penduduk yang relatif tinggi di daerah Utara-Timur Laut sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 1 (a). Hal ini

kurang menguntungkan dari segi potensi paparan kepada populasi karena potensi dampaknya menjadi relatif lebih besar. Ditinjau dari segi kecepatan angin, data menunjukkan kecepatan angin yang relatif tinggi memiliki frekuensi kejadian yang relatif tinggi pula. Kondisi stabilitas atmosfer sebagian besar berada pada kondisi stabil sehingga dispersi akan cenderung rendah yaitu zat pencemar akan lebih lambat terencerkan karena sedikitnya gerakan turbulens dari udara. Hal ini kurang menguntungkan dari sisi kecepatan pengenceran yang lebih rendah namun memiliki konsekuensi berupa cakupan luasan yang biasanya lebih kecil. Pada Gambar 2 (b) terlihat bahwa sebagian kondisi stabilitas atmosfer dominan berada pada kelas 5 (stabil).

Simulasi menghasilkan rerata dosis efektif perorangan menurut jarak radius dari titik lepasan yang diberikan dalam Gambar 4. Dosis maksimum dan minimum untuk 24 jam pertama setelah lepasan terjadi (dampak jangka pendek) adalah masing-masing  $6,36 \times 10^{-4}$  Sv pada radius 0,15 km dan  $3,44 \times 10^{-6}$  Sv pada radius 4,5 km. Dosis maksimum dan minimum dalam jangka panjang adalah masing-masing  $8,18 \times 10^{-3}$  Sv pada radius 0,15 km dan  $4,64 \times 10^{-5}$  Sv pada radius 4,5 km. Pada umumnya dosis rerata radial akan menurun dengan bertambahnya jarak dari titik lepasan. Kecenderungan penurunan dosis efektif terhadap jarak memiliki pola yang sama antara dosis jangka pendek dan jangka panjang.



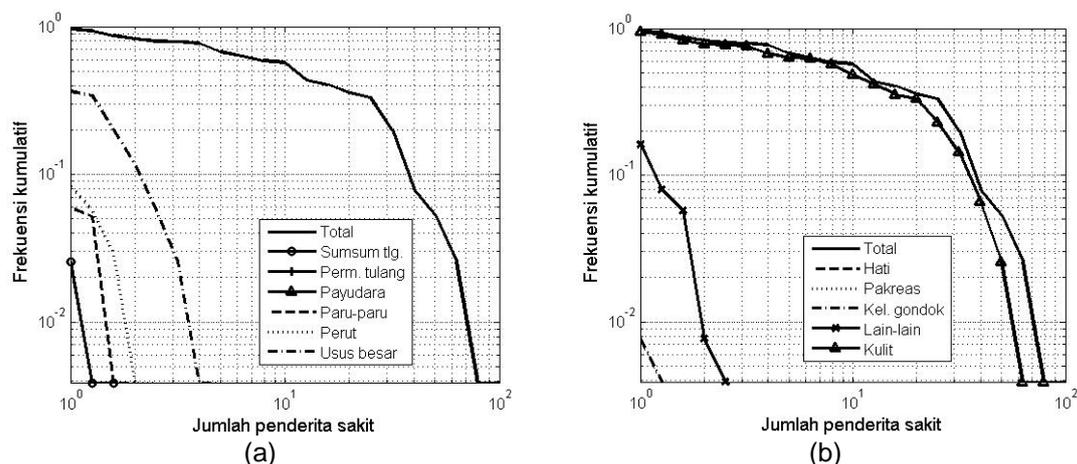
Gambar 2. Dosis efektif perorangan jangka pendek dan panjang menurut jarak dari titik lepasan.



Gambar 3. Jumlah rerata (a) penderita sakit dan (b) kematian dalam jangka panjang dalam radius 5 km ( $thn^{-1}$ ) untuk kecelakaan RSG-GAS

Sebagai akibat dari paparan dosis sebagaimana digambarkan oleh Gambar 4, diperkirakan bahwa paparan dalam jangka pendek (24 jam) tidak akan menyebabkan sakit maupun kematian dan diprediksikan tidak ada kejadian kanker dalam radius 5 km akibat paparan jangka pendek tersebut.

Dalam jangka panjang, dengan paparan berdurasi 50 tahun sejak kecelakaan dan tanpa dilakukannya tindakan mitigasi seperti dekontaminasi, diprediksikan akan menyebabkan timbulnya sejumlah gangguan penyakit dengan jumlah rata-rata penderita mencapai maksimum sekitar 3,8 orang per tahun untuk populasi yang tinggal pada jarak sekitar 400 m dan 1,5 km dari titik lepasan untuk semua jenis penyakit (Gambar 5). Puncak penderita berada pada lokasi ini karena pada radius 500 meter terdapat kerapatan populasi yang relatif lebih tinggi sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 1 (b). Jenis penyakit yang diderita didominasi oleh penyakit yang terkait dengan paparan eksternal yang disebabkan deposisi zat radioaktif diatas tanah. Jenis penyakit lain yang diderita seperti penyakit pada organ internal seperti usus besar umumnya memiliki jumlah penderita yang jauh lebih rendah. Untuk mereduksi dampak timbulnya penyakit oleh paparan eksternal dapat dilakukan tindakan kontaminasi, terutama apabila daerah-daerah tersebut memiliki kerapatan penduduk yang tinggi. Jumlah penderita akan cenderung mengecil hingga mencapai radius 2 km dan kemudian tampak menurun secara asimtotik dengan jumlah penderita mencapai sekitar 2 orang per tahun dalam jangka panjang karena kerapatan penduduk yang cenderung meninggi dengan bertambahnya radius meskipun konsentrasi dosisnya terus menurun.



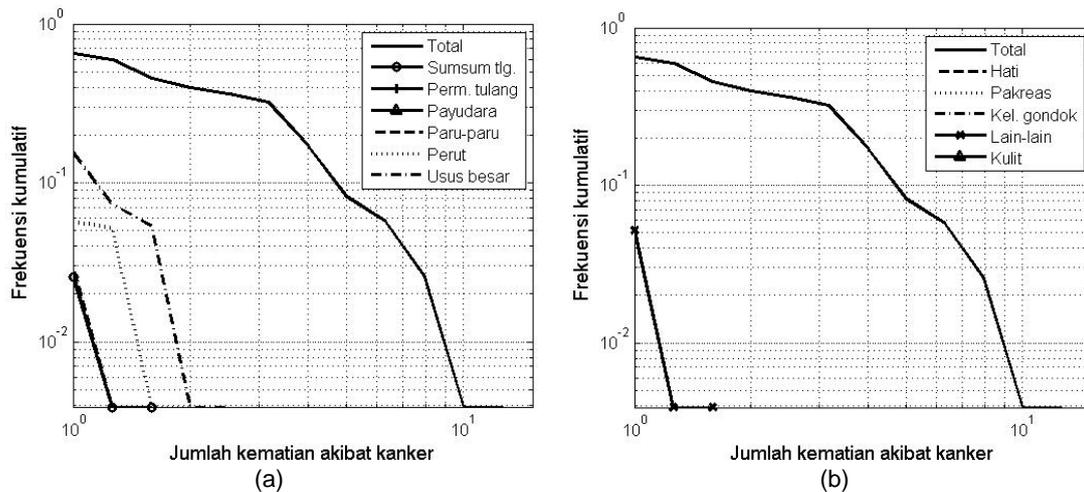
**Gambar 6. CCDF untuk penderita sakit dalam jangka panjang ( $thn^{-1}$ ) dalam radius 5 km dari KNS**

Gambar 6 menampilkan fungsi distribusi kumulatif komplementer (CCDF) untuk jumlah penderita sakit dalam jangka panjang yang diakibatkan paparan radiasi secara terus-menerus selama 50 tahun. Setiap titik dalam kurva dapat diartikan sebagai kebolehjadian paparan yang dapat mengakibatkan penyakit untuk dosis paparan sejumlah atau lebih besar dari nilai pada aksis horizontal. Jenis penyakit yang diderita didominasi oleh sindroma kulit terbakar (lihat Gambar 6 (b)) dan diikuti oleh sindroma pencernaan/gastrointestinal (GI) (Gambar 6 (a)) dan diikuti oleh jenis penyakit lainnya dengan frekuensi yang terbilang sangat kecil.

Gambar 7 memberikan CCDF prediksi jumlah kematian akibat kanker sebagai dampak jangka panjang. Dampaknya didominasi oleh kanker usus-besar, pencernaan dan kanker lainnya yang disebabkan oleh penelanan (ingesti) zat radioaktif dalam waktu yang cukup lama. Dampak paling kecil diterima oleh permukaan kulit dan tulang karena biasanya disebabkan oleh paparan eksternal. Bila dibandingkan dengan dampak jangka pendek yang didominasi oleh dampak terhadap kulit, dalam jangka panjang dampaknya hampir tidak ada karena konsentrasi yang lebih kecil oleh faktor dispersi.

Dampak yang relatif lebih besar akan dirasakan oleh populasi pada radius 3,5 km dan tempat-tempat lain dengan kerapatan populasi yang relatif besar. Dalam hal ini kerapatan populasi yang lebih besar berada pada sektor Utara-Timur Laut, yang sejajar

dengan tiupan arah angin dominan sehingga populasi pada daerah ini memiliki kemungkinan terdampak relatif besar.



**Gambar 7. CCDF untuk kematian akibat kanker ( $thn^{-1}$ ) untuk lepasan RSG-GAS**

Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN) dalam SK Ka. BAPETEN No. 1 tahun 2010/10 menyebutkan bahwa untuk reaktor dengan kapasitas lebih dari 100 MWt dan instalasi atau fasilitas dengan potensi risiko tinggi untuk menghasilkan lepasan radioaktif yang mengakibatkan dampak deterministik serius dapat dimasukkan dalam Ancaman Radiologik kategori 1. Daerah kedaruratan dan radius untuk instalasi/fasilitas dengan kategori ancaman 1 dapat didefinisikan sebagai: radius 3 – 5 km untuk *Precautionary Action Zone* (PAZ), radius 25 km untuk *Urgent Protective Zone* (UPZ), and radius 300 km untuk *Food Restriction Planning* (FRP). Dalam UPZ, persiapan perlu dilakukan untuk mengambil tindakan proteksi berdasarkan pemantauan lingkungan. Dalam zona ini, tindakan perlindungan disarankan untuk dilakukan ketika dosis efektif melebihi 10 mSv. Dalam kasus kecelakaan yang diasumsikan dalam tulisan ini, dosis maksimum dalam jangka pendek pada radius 1,5 km tercatat tidak melebihi 1 mSv sehingga penetapan PAZ dalam radius 3-5 km dapat dianggap mencukupi. Dalam jangka panjang, tindakan remediasi terhadap daerah/lahan yang terkontaminasi dapat dilakukan sehingga paparan akibat *ground shine* dapat diperkecil sehingga dosis dalam jangka panjang juga tidak melampaui 10 mSv.

## KESIMPULAN

Analisis kebolehjadian terhadap konsekuensi kecelakaan parah di Kawasan Nuklir Serpong menunjukkan bahwa dampak kesehatan jangka pendek akibat paparan pada 24 jam pertama tidak tampak mengkhawatirkan untuk daerah disekitar kawasan hingga radius 5 km. Dampak kesehatan tingkat lanjut memprediksikan sejumlah penyakit yang dapat diderita dan jumlah kematian yang dapat terjadi akibat paparan dalam jangka panjang (50 tahun). Bila dalam kejadian kecelakaan dilakukan tindakan retensi dan penanggulangan, maka risiko yang dihadapi akan menjadi lebih kecil, terutama terhadap penyakit yang timbul akibat paparan eksternal. Dalam jangka panjang, tindakan mitigasi yang dapat dilakukan antara lain berupa normalisasi terhadap daerah-daerah yang tercemar unsur radioaktif utamanya pada daerah-daerah dengan kerapatan penduduk tinggi sehingga risiko sakit ataupun kematian dapat diperkecil. Kondisi angin menunjukkan bahwa frekuensi angin yang bertiup ke daerah berkerapatan penduduk tinggi cukup besar sehingga pada daerah-daerah di sebelah Utara hingga Timur Laut dapat diprioritaskan untuk menempatkan alat ukur radiasi dalam jumlah yang lebih banyak dibandingkan sektor-sektor lainnya.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Para penulis mengucapkan terima kasih kepada Kepala Pusat Kajian Sistem Energi Nuklir dan Panitia Seminar Nasional Infrastruktur Energi Nuklir (SIEN) 2018 yang telah mengizinkan penulisan makalah ini dan mengikutsertakannya dalam seminar ini. Penghargaan juga disampaikan kepada ibu Dra. Heni Susiati M.Si., yang telah memberikan informasi/data penduduk disekitar Kawasan Nuklir Serpong.

## DAFTAR PUSTAKA

1. QU J, "The determination of the area affected by relocation after nuclear accidents", Nuclear Engineering and Design, Volume 223 No. 41 (2003).
2. RASMUSSEN, Norman C., dkk., "Reactor safety study. An assessment of accident risks in U. S. commercial nuclear power plants. Executive Summary WASH-1400", (NUREG-75/014), Rockville, MD, USA: Federal Government of the United States, U.S. Nuclear Regulatory Commission (1975).
3. MCKENNA T. J., GIITTER J. G., "NUREG 1228 Source term estimation during incident response to nuclear power plant accidents", Rockville, MD, USA: Federal Government of the United States, U.S. Nuclear Regulatory Commission (1988).
4. JONES J. A., dkk., "Probabilistic Accident Consequence Uncertainty Assessment Using COSYMA: Methodology and Processing Techniques", EC 2001 (2001).
5. HAYWOOD S M, JONES J A, EHRHARDT J, "PC COSYMA Version 1.0 User Guide", Brussels-Luxembourg: National Radiological Protection Board and Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, ECSC-EEC-EAEC (1993).
6. ICRP, "1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection", ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21 (1991).
7. ANONIM, "West Bangka, Dispersion and dose assessment Final Topical Report Year-2", PT. Surveyor Indonesia, Jakarta (2012).
8. CAO, J. Z., dkk., "Adaptation of COSYMA and assessment of accident consequences for Daya Bay nuclear power plant in China", Journal of Environmental Radioactivity, 48 265 (2000).
9. ANONIM, "West Bangka in Figures", BPS-Statistics of Bangka Barat Regency, Muntok (2015).
10. BAPETEN, "Chairman Regulation Number 1 Year 2010 on Nuclear emergency preparedness and mitigation", Indonesian Nuclear Energy Regulatory Agency – BAPETEN, Jakarta (2010).

## PROYEKSI EMISI CO<sub>2</sub> DARI SEKTOR LISTRIK DI INDONESIA

Edwaren Liun<sup>1</sup>, Sahala M. Lumbanraja<sup>2</sup>, Imam Bastori<sup>3</sup>, Rizki Firmansyah SB<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>Pusat Kajian Sistem Energi Nuklir

email: edwaren@batan.go.id

### ABSTRAK

**PROYEKSI EMISI CO<sub>2</sub> DARI SEKTOR LISTRIK DI INDONESIA.** Telah dilakukan perhitungan, analisis dan proyeksi emisi CO<sub>2</sub> hingga tahun 2060 untuk sektor pembangkitan listrik di Indonesia. Makalah ini bertujuan mengestimasi dan memproyeksikan emisi CO<sub>2</sub> dari sistem pembangkitan tenaga listrik di Indonesia. Hasil yang diperoleh adalah besaran kuantitatif emisi CO<sub>2</sub> dari sektor pembangkitan. Peningkatan emisi CO<sub>2</sub> didorong oleh pertumbuhan permintaan energi listrik yang tinggi di seluruh wilayah Indonesia, terutama sistem di luar Sumatera, Jawa, Madura dan Bali (Sujamali) di samping karena rendahnya kontribusi pembangkit yang bebas emisi CO<sub>2</sub>. Kecenderungan penggunaan bahan bakar fosil pada pembangkit termal masih cukup tinggi sedangkan pembangkit termal bebas emisi CO<sub>2</sub> seperti nuklir sudah tampak dengan jelas bahwa energi nuklir belum akan berkontribusi dalam waktu dekat ini. Pertumbuhan emisi diestimasi sebesar 6,65% untuk gabungan sistem Sumatera, Jawa Madura dan Bali (Sujamali). Sementara untuk sistem Luar Sujamali pertumbuhan lebih tinggi, yaitu sebesar 10,17% per tahun. Angka absolut emisi tahunan CO<sub>2</sub> untuk sistem Sujamali naik dari 103,31 juta ton pada tahun 2015 menjadi 860,19 juta ton dengan opsi nuklir, atau menjadi 1,26 miliar ton tanpa opsi nuklir pada tahun 2060. Sedangkan emisi CO<sub>2</sub> sistem Luar Sujamali adalah sebesar 15,73 juta ton pada tahun 2015 menjadi 592,38 juta ton pada tahun 2060 tanpa opsi nuklir.

**Kata kunci:** pertumbuhan ekonomi, permintaan energi, emisi CO<sub>2</sub>, bahanbakar fosil, opsi nuklir.

### ABSTRACT

**PROJECTION OF CO<sub>2</sub> EMISSIONS FROM ELECTRIC SECTOR IN INDONESIA.** Calculation, analysis and projections of CO<sub>2</sub> emissions have been carried out until 2060 for the electricity generation sector in Indonesia. This paper aims to estimate and project CO<sub>2</sub> emissions from electric power generation systems in Indonesia. The results obtained are quantitative quantities of CO<sub>2</sub> emissions from the generation sector. The increase in CO<sub>2</sub> emissions is driven by the high growth of electricity demand in all parts of Indonesia, especially systems outside Sumatra, Java, Madura and Bali (Sujamali) in addition to the low contribution of CO<sub>2</sub>-free plants. The trend of using fossil fuels in thermal plants is still quite high while CO<sub>2</sub>-free thermal plants such as nuclear have clearly seen that nuclear energy will not contribute in the near future. Emission growth is estimated at 6.65% for the combined system of Sumatra, Java Madura and Bali (Sujamali). While for the Luar Sujamali system, the growth is higher, which is 10.17% per year. The absolute number of annual CO<sub>2</sub> emissions for the Sujamali system rose from 103.31 million tons in 2015 to 860.19 million tons with a nuclear option, or to 1.26 billion tons without a nuclear option in 2060. While the CO<sub>2</sub> emissions of the Outer Sujamali system are 15.73 million tons in 2015 to 592.38 million tons in 2060 without nuclear options.

**Keywords:** economic growth, energy demand, CO<sub>2</sub> emissions, fossil fuels, nuclear options.

### PENDAHULUAN

Dalam penelitian ini *Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impacts (MESSAGE)* digunakan untuk melakukan optimasi pasokan dalam memenuhi kebutuhan energi hingga tahun 2060. Sebagaimana konsekuensi logisnya bahwa struktur energi sangat berpengaruh pada emisi polutan ke udara, maka emisi CO<sub>2</sub> akan ditentukan oleh teknologi pembangkitan dan karakteristik bahanbakar yang digunakan. Menurut laporan EIA, konsumsi batubara dunia diproyeksikan meningkat sebesar 70% yang hingga 2050 akan mencapai 11 juta kiloton (EIA, 2013)[1]. Sedangkan batubara merupakan bahanbakar fosil padat yang terbentuk dari rantai karbon yang bila dibakar melepaskan gas CO<sub>2</sub> ke udara. Perubahan iklim adalah risiko sistemik global yang serius yang mengancam

kehidupan dan ekonomi akibat konsentrasi tinggi CO<sub>2</sub> di udara melalui efek rumah kacanya[2]. Pengamatan peningkatan suhu rata-rata global, pencairan salju dan es yang meluas, dan peningkatan permukaan laut rata-rata global menunjukkan bahwa iklim pada lapisan atmosfer bumi sudah memanas (IPCC, 2007a)[3]. Jika emisi gas rumah kaca (GRK) terus meningkat, ia akan menyebabkan berbagai dampak buruk dan berpotensi memicu perubahan skala besar, tidak dapat diubah dan bencana (IPCC, 2007b) yang akan melebihi kapasitas adaptasi sistem alam dan sosial[3].

Masalah emisi *final antimon* di masa depan cukup rumit, seperti pengembangan ekonomi regional, konsumsi energi dan konstitusi bahan bakar fosil seperti batu bara, pengembangan dan transisi teknologi produksi industri, penerapan perangkat pengurangan polusi air, serta kemungkinan reformasi kebijakan[4].

Makalah ini bertujuan untuk mendiskusikan lepasan CO<sub>2</sub> secara kuantitatif dari sektor pembangkitan tenaga listrik di Indonesia hingga tahun 2060, di mana pada saat itu penduduk Indonesia diproyeksikan sebesar 370 juta jiwa atau lebih dengan GDP sebesar 40 ribu USD per kapita[5].

## DATA DAN ASUMSI

Permintaan energi yang didorong oleh pertumbuhan penduduk, pertumbuhan ekonomi dan perubahan pola konsumsi (gaya hidup) akan terus meningkat selama beberapa dasawarsa mendatang. Angka pertumbuhan penduduk Indonesia diasumsikan turun secara bertahap dari 1,38 % pada tahun 2010, lalu menjadi 1,19 % pada tahun 2015, 1,00% pada tahun 2020, 0,80% pada tahun 2025 dan 0,62% pada tahun 2030[6].

Berdasarkan data historis dan analisis karakteristik kurva pertumbuhan penduduk, jumlah penduduk Indonesia pada tahun 2060 berkisar pada angka 270 juta jiwa[5]. Sedangkan permintaan energi akan mencapai 252 ribu MWe untuk Sumatera, Jawa, Madura dan Bali (Sujamali), dan 67 ribu MWe untuk wilayah Indonesia selain Sujamali. Pasokan energi listrik didasarkan pada hasil studi neraca energi menggunakan program MESSAGE yang mengoptimasi sistem pasokan energi dengan opsi nuklir untuk seluruh wilayah Indonesia. Berdasarkan konsumsi bahanbakar dalam berbagai jenis, lepasan CO<sub>2</sub> dari sistem pembangkitan dapat ditentukan berdasarkan parameter masing-masingnya.

Sumber emisi CO<sub>2</sub> yang difokuskan dalam makalah ini adalah yang terkait dengan produksi energi listrik. Penggunaan batubara adalah opsi paling penting dalam pertimbangan tekno ekonomi dalam pembangkitan tenaga listrik di Indonesia. Di samping ketersediaannya yang memadai dan harga rendah, teknologinya relative sederhana dibandingkan dengan teknologi nuklir sebagai pembangkit yang sesuai untuk beban dasar. Pembangkit listrik termal berbahan bakar fosil yang lazim digunakan di Indonesia adalah PLTU batubara, PLTU minyak, PLTD dan PLTG. Dengan demikian kuantitas sumber emisi CO<sub>2</sub> didasarkan pada sejumlah pembangkit ini.

Parameter emisi didasarkan kandungan kimia bahanbakar fosil. Ada tiga jenis bahanbakar fosil yaitu padat cair dan gas. Jenis padat adalah berbentuk batubara dengan kandungan karbon berkisar antara 64 – 69 persen berat[7]. Jenis cair berbentuk minyak yang didominasi oleh minyak bumi dengan kandungan karbon berkisar antara 83 – 87 persen berat[8]. Bahanbakar gas yang umum digunakan dalam pembangkitan listrik adalah gas alam. Gas alam adalah gas kaya hidrokarbon yang terutama terdiri dari metana. Energi tinggi yang dihasilkan dari pembakaran gas alam membuatnya berguna sebagai bahan bakar. Namun, ini dianggap sebagai bahan bakar bersih dibandingkan dengan bahan bakar fosil lainnya karena lebih rendah emisi gas yang dapat merusak lingkungan. Pergeseran global dari bahan bakar fosil ke gas alam melambangkan jalan menuju masa depan dengan emisi karbon yang lebih rendah[9].

## TEORI DAN POKOK BAHASAN

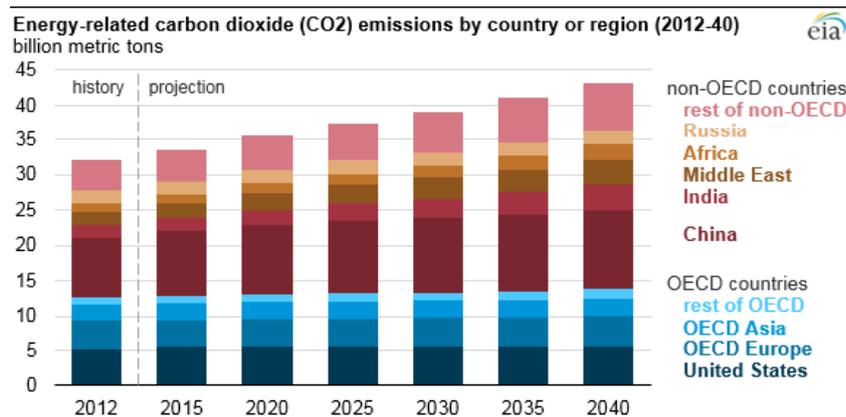
### Dampak lingkungan CO<sub>2</sub>

Salah satu dampak dari penggunaan energi adalah dilepaskannya CO<sub>2</sub> ke atmosfer. Sebagaimana telah diketahui, CO<sub>2</sub> adalah gas rumah kaca yang berakibat terperangkapnya panas yang berasal dari matahari pada lapisan atmosfer bumi yang selanjutnya akan membuat iklim di permukaan bumi semakin panas. Perubahan iklim ini adalah risiko sistemik global yang serius yang mengancam kehidupan dan ekonomi. Pengamatan tentang peningkatan suhu rata-rata global, pencairan salju dan es yang meluas, dan peningkatan

permukaan laut rata-rata global menunjukkan bahwa iklim sudah memanas (IPCC, 2007a)[3].

Peran karbon dioksida atmosfer ( $\text{CO}_2$ ) dalam memaksa suhu global sangat penting untuk dibahas dipahami, yakni pemanasan global bersifat antropogenik.  $\text{CO}_2$  di atmosfer dan gas buang lainnya yang dipancarkan ke atmosfer oleh pembakaran bahan bakar fosil dan perubahan pola penggunaan lahan menangkap energi inframerah yang terpancar dari permukaan bumi, memanaskan atmosfer dan permukaan bumi oleh efek "rumah kaca". Emisi antropogenik  $\text{CO}_2$  dipercepat pada awal zaman industri pada pertengahan abad ke-18 dan sekarang meningkatkan konsentrasi  $\text{CO}_2$  di atmosfer sebesar 1-2 bagian per juta volume (ppmv) setiap tahun. Ini adalah tingkat peningkatan yang mungkin belum pernah terjadi sebelumnya dalam sejarah iklim bumi selama kehidupan manusia. Selama periode yang tersebut bumi dihangatkan oleh  $\sim 0,8^\circ\text{C}$ [10].

World Meteorological Organization (WMO) menyimpulkan bahwa konsentrasi gas rumah kaca pada tahun 2011 (tahun terakhir saat itu) adalah yang tertinggi dalam catatan. Fenomena ini menjelaskan bahwa telah terjadi peningkatan temperature global dari tahun ke tahun. Karbon dioksida, metana, dan nitro oksida adalah gas rumah kaca yang mendorong pemanasan tambahan masing-masing menjadi 140 persen, 259 persen, dan 120 persen lebih tinggi dari tingkat pra-industri. Mengingat bahwa emisi gas rumah kaca global terus terakumulasi di atmosfer, 'rekor tinggi' mungkin tidak terlalu mengejutkan. Tetapi WMO juga menyimpulkan bahwa meskipun ada komitmen internasional untuk mengurangi emisi gas rumah kaca, jumlah karbon dioksida di atmosfer terus meningkat pada dengan kenaikan yang cukup stabil selama dekade terakhir[1]. Gambar 1 menunjukkan emisi  $\text{CO}_2$  negara-negara di dunia hingga tahun 2040.



Gambar 1. Emisi  $\text{CO}_2$  di dunia[11]

Meningkatnya emisi gas rumah kaca (GRK) menyebabkan berbagai dampak buruk dan berpotensi memicu perubahan skala besar, tidak dapat dipulihkan dan akan menjadi bencana (IPCC, 2007b) yang akan melebihi kapasitas adaptasi sistem alam dan sosial. Biaya lingkungan, sosial dan ekonomi mungkin akan menjadi signifikan. Kesepakatan yang dicapai di Cancun, Meksiko, pada Konferensi Perubahan Iklim Perserikatan Bangsa-Bangsa 2010 mengakui perlunya pengurangan mendalam emisi gas rumah kaca global untuk membatasi peningkatan suhu rata-rata global hingga 2 derajat Celcius ( $2^\circ\text{C}$ ) di atas tingkat pra-industri. Peningkatan suhu lebih dari  $2^\circ\text{C}$  cenderung mendorong komponen sistem iklim bumi melewati ambang kritis, atau "titik kritis" (EEA, 2010)[3].

#### Data dan asumsi

Kuantifikasi lepasan  $\text{CO}_2$  ke atmosfer sebanding dengan jumlah dan jenis bahan bakar fosil yang dikonsumsi. Namun intensitas pelepasan karbon (perbandingan  $\text{CO}_2$  yang dilepaskan terhadap energi yang dikonsumsi) di masing-masing negara juga berbeda. Sebagai contoh, pada tahun 2012, negara-negara non-OECD melepaskan 62 juta metrik ton  $\text{CO}_2$  per kuadriliun british thermal units (MMmt  $\text{CO}_2$  / quad Btu) dari energi yang dikonsumsi. Intensitas karbon tahun 2012 di negara-negara OECD lebih rendah, sekitar 53 MMmt  $\text{CO}_2$  / quad Btu. Meskipun dalam proyeksi, intensitas  $\text{CO}_2$  negara-negara non-OECD menurun lebih cepat daripada negara-negara OECD, namun pada 2040 intensitas karbon negara-

negara non-OECD masih lebih tinggi daripada intensitas karbon negara-negara OECD tahun 2012[11].

Bahanbakar fosil bentuk padat atau batubara dan jenisnya mempunyai lebih banyak varietas dengan kandungan kimia khususnya kadar karbon yang beragam. Untuk batubara Indonesia juga mempunyai kandungan karbon yang variasi antara 46,75% sampai 68,64%[7]. Dalam perhitungan di sini diambil nilai rata-rata sebesar 65,0%. Sedangkan bahanbakar minyak yang digunakan perbedaan kandungan karbon lebih menyempit yang berada sekitar 36%.

### Parameter bahanbakar dan sistem pembangkitan

Bahanbakar fosil adalah sumber energi terbesar berkontribusi dalam pembangkitan energi listrik di Indonesia. Ketiga jenis bahanbakar fosil tersebut yaitu batubara, minyak dan gas bumi masing-masing mempunyai kelebihan dan kekurang sehingga penggunaan kesemuanya bertujuan untuk saling mengisi. Beberapa aspek penting dalam perhitungan emisi berkaitan erat dengan jenis, bentuk dan parameter bahanbakar. Antara lain kandungan energi, kadar atom karbon, *heat rate* sistem pembangkitan. Parameter bahanbakar tentunya menjadi penting dalam menghitung emisi CO<sub>2</sub>. Table .. berikut adalah parameter yang umum bahanbakar fosil spesifik Indonesia terkait dengan faktor emisi CO<sub>2</sub>nya[7][8].

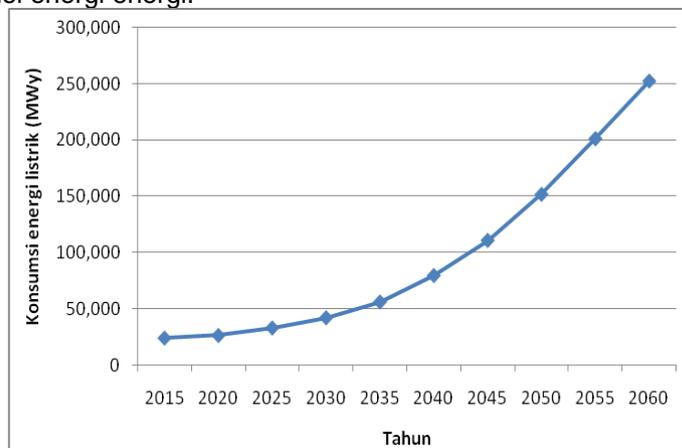
Tabel 1. Parameter bahanbakar fosil pada nilai rata-rata\*

	Batubara	Minyak	Gas bumi
Nilai kalor	5300	10224	12609
<i>Heat rate</i>	2270	3310	2096
Kandungan karbon	65%	85%	75%

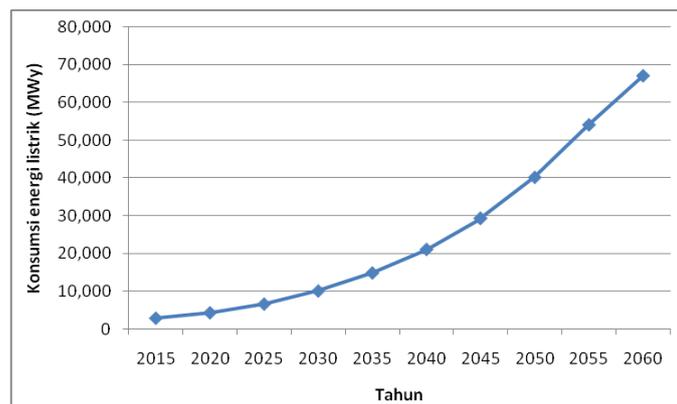
\*Dari berbagai sumber

Emisi CO<sub>2</sub> yang berasal dari pembangkit berbahanbakar fosil mempunyai korelasi dengan kapasitas total sistem pembangkitan. Dari studi optimasi sistem pembangkitan Wilayah 1 Indonesia yang meliputi Sumatera, Jawa, Madura dan Bali (Sujamali), proyeksi kapasitas pembangkitan dengan opsi nuklir adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 2, yang mana hingga tahun 2060 kapasitas total pembangkitan akan mencapai 252 MWe. Sebagian besar sumber energi pembangkitan adalah batubara sebagai solusi optimum tanpa *constraint* atau pembatasan pembakaran batubara khususnya di sektor listrik. Sementara untuk wilayah Indonesia selain Sujamali (Luar Sujamali) diproyeksikan akan mencapai 67 ribu MWe pada tahun 2060, seperti ditunjukkan pada Gambar 3.

Hasil optimasi sistem energi menampilkan konfigurasi sumber energi yang dibutuhkan untuk pembangkitan tenaga listrik. Dari solusi optimum dari model, diperoleh hasil yang dapat diekstraksi berupa angka konsumsi, produksi, harga dan bentuk energi pada level yang berbeda[12] Level energi dapat disesuaikan dengan keadaan yang berlangsung pada energi energi yang dimodelkan. Gambar 4 adalah salah satu contoh level energi pada model energi energi.

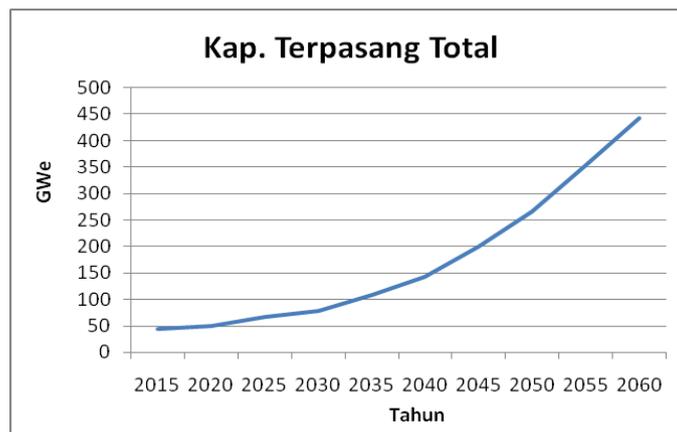


Gambar 2. Proyeksi konsumsi energy listrik Sujamali hingga tahun 2060



Gambar 3. Proyeksi konsumsi energy listrik Luar Sujamali hingga tahun 2060

Penyediaan energy listrik akan membutuhkan sejumlah pembangkit listrik yang dapat memasok kebutuhan demand secara terus menerus. Dengan mengacu pada total konsumsi, kapasitas terpasang yang dibutuhkan hingga tahun 2060 adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Pada tahun 2060 total kapasitas terpasang dirproyeksikan sekitar 443,44 GWe dengan faktor kapasitas sekitar 72 hingga 75%.



Gambar 4. Proyeksi kebutuhan kapasitas terpasang total

Pada model MESSAGE untuk mengekstraksi hasil dalam modus interaktif, sejumlah bentuk daftar disediakan dengan memilih level energi (Gambar 5), dan variabel penting lainnya (yaitu input, output atau harga). Bentuk energi yang digunakan diekstraksi melalui daftar teknologi yang menunjukkan semua jenis teknologi energi yang dipilih. Komposisi bauran energi yang diperoleh dari proses optimasi disebut sebagai solusi optimum. Selanjutnya untuk menganalisis kuantitas emisinya, bauran energi hasil optimasi diuraikan berdasarkan parameter dan karakteristik emisinya.

<b>FINAL</b>
<b>INTERMEDIATE</b>
<b>SECONDARY</b>
<b>PRIMARY</b>
<b>RESOURCE</b>

Gambar 5. Level energi yang diterapkan pada model

Di tiga medan isian pertama pada Model Message disediakan daftar opsi. Program ini memberikan hasil untuk semua teknologi yang digunakan, bahkan dapat merepresentasikan bentuk teknologi energi yang dipilih sesuai keadaan aktualnya. Di medan data untuk level, tercantum semua tingkat dan bentuk energi yang ditentukan dalam skenario yang dipilih. (lihat Bab 3 untuk menentukan level).

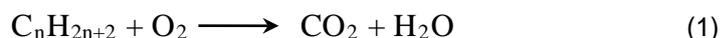
## HASIL DAN PEMBAHASAN

Secara kuantitatif emisi CO<sub>2</sub> dihitung berdasarkan volume konsumsi bahanbakar. Ketiga bentuk bahanbakar fosil yaitu padat cair dan gas berkontribusi melepaskan gas CO<sub>2</sub> ke atmosfer menurut intensitas dan volume masing-masing. Model MESSAGE melakukan optimasi berdasarkan *least cost* di samping batasan-batasan (*constraint*) yang diinputkan ke dalam model, sehingga kontribusi emisi CO<sub>2</sub> dari masing-masing jenis bahanbakar mempunyai kuantitas yang beragam untuk mendapatkan biaya terendah.

### Perhitungan Emisi

Perhitungan intensitas emisi karbon (CO<sub>2</sub>) dalam makalah diperoleh dari kandungan bahan bakar yang terdiri dari rantai karbon dari bahanbakar fosil. Sifat dari bahanbakar fosil adalah sedemikian, bahwa semakin panjang rantai karbonnya akan semakin tinggi kadar karbonnya. Hal ini terkait dengan peringkat batubara perbandingan atom hydrogen yang merupakan sumber energi utama didalam rantai karbon tersebut[13]. Emisi CO<sub>2</sub> berkorelasi secara langsung dengan kandungan karbon di dalam bahanbakar. Bahanbakar fosil adalah rantai karbon yang dalam pembakaran bereaksi dengan udara menghasilkan panas dan CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O.

Rantai karbon didalam bahanbakar fosil mempunyai rumus kimia dan konfigurasi yang beragam tergantung pada jenis dan peringkat bahannya. Namun secara umum biasa diasumsikan sebagai



Sedangkan secara kuantitatif emisi CO<sub>2</sub> ditentukan oleh kuantitas produksi energi dan kadar karbon di dalam bahanbakar. Emisi (E) dapat dihitung berdasarkan faktor emisi (EF) dikalikan dengan volume (V), atau

$$E = EF \times V \quad (2)$$

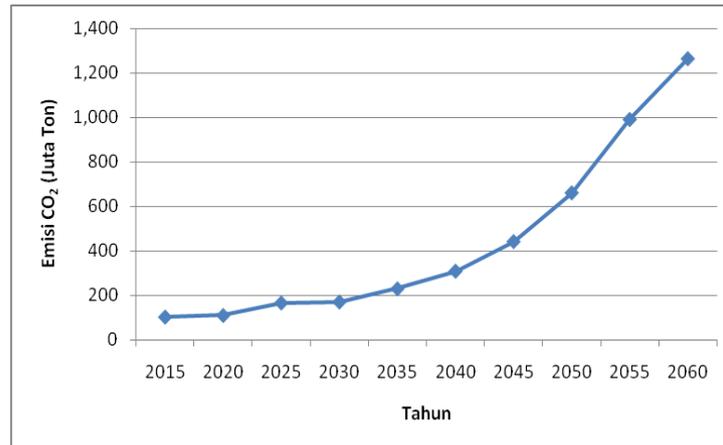
Namun persamaan (1) tidak dapat berdiri sendiri sehingga persamaan (1) perlu diuraikan menjadi lebih rinci. Secara sederhana persamaan kuantitas emisi berdasarkan kandungan panas didalam bahanbakar fosil adalah:

$$Q = G \times 8760 \times HR \times C \times \frac{11}{3 HC} \quad (3)$$

- Q = kuantitas emisi CO<sub>2</sub> dalam ton per tahun
- G = energi yang dibangkitkan dalam *megawatt year*
- HR = *heat rate* pembangkit listrik
- C = kadar atom karbon didalam bahanbakar (% berat)
- HC = kandungan panas bahanbakar.

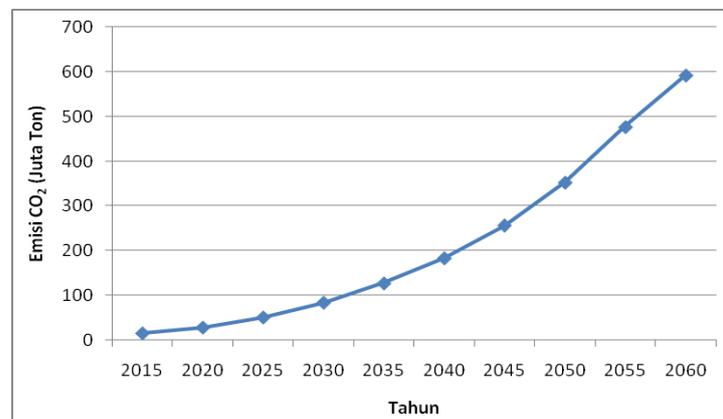
Karbon dioksida merupakan produk normal dari pembakaran, meskipun ia dapat ditangkap dengan biaya yang relative mahal. Selain itu penangkapan gas CO<sub>2</sub> butuh tempat penyimpanan yang keandalannyapun tidak dapat dijamin kelestariannya.

Berdasarkan hasil perhitungsn sistem Sujamali diproyeksikan akan melepaskan emisi CO<sub>2</sub> sebesar 1,26 milyar ton pada tahun 2060. Angka ini jauh lebih besar daripada emisi dari energi luar Sujamali karena energi telah jauh lebih besar daripada energi luar Sujamali dari waktu-waktu sebelumnya. Gambar 5 dan Gambar 6 berikut adalah kuantitas emisi CO<sub>2</sub> masing-masing dari system Sujamali dan Luar Sujamali.



Gambar 5. Proyeksi emisi CO<sub>2</sub> dari sistem Sujamali

Kuantitas emisi CO<sub>2</sub> dari energi luar Sujamali secara absolut jauh lebih rendah sebanding dengan kapasitas pembangkitan.



Gambar 6. Proyeksi emisi CO<sub>2</sub> dari sistem Luar Sujamali

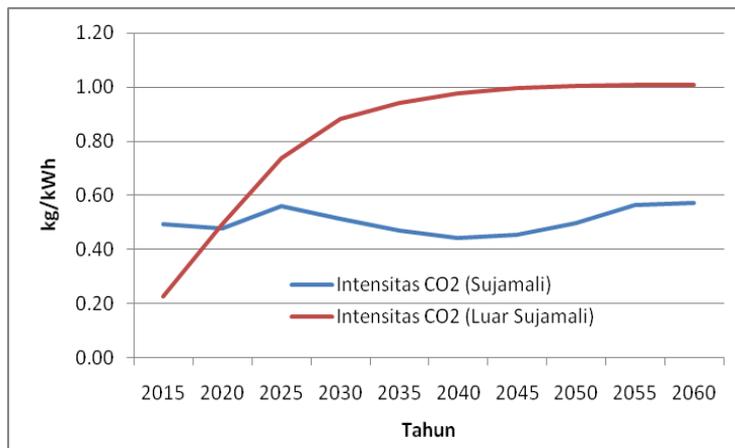
### Intensitas emisi CO<sub>2</sub>

Pengembangan system kelistrikan Indonesia akan menghasilkan sekitar 319,28 ribu MWy listrik pada tahun 2060 dengan kebutuhan kapasitas terpasang sekitar 443,44 GWe dari berbagai jenis teknologi pembangkitan termasuk nuklir dengan jenis pembangkit dominan berbahan bakar fosil. Sebagai konsekuensinya akan terjadi peningkatan emisi CO<sub>2</sub> dalam tingkat yang signifikan.

Intensitas CO<sub>2</sub> didefinisikan sebagai kuantitas CO<sub>2</sub> yang dilepaskan per satuan energi listrik yang dibangkitkan. Angka intensitas tergantung pada teknologi pembangkitan dan karakteristik bahan bakar yang digunakan. Meskipun di wilayah Sujamali diproyeksikan bahwa intensitas tidak meningkat secara signifikan bahkan ada kecenderungan menurun, namun di wilayah Luar Sujamali intensitas cenderung meningkat secara tajam hingga tahun 2030 dan tidak ada tanda-tanda akan terjadi penurunan. Hal ini disebabkan karena peningkatan *demand* listrik yang tajam diikuti oleh peningkatan kapasitas pembangkit listrik berbahan bakar fosil khususnya batubara tanpa penerapan *constraint* maupun intervensi kebijakan lainnya untuk pembatasan emisi CO<sub>2</sub>. Gambar 7 menunjukkan intensitas emisi CO<sub>2</sub> untuk wilayah Sujamali dan Luar Sujamali. Berdasarkan solusi optimum dari running Model MESSAGE, di atas tahun 2025 telah berlangsung introduksi energi nuklir di wilayah Sujamali sehingga peningkatan intensitas emisi CO<sub>2</sub> dapat ditahan hingga tahun 2060.

Intensitas emisi CO<sub>2</sub> tergolong tinggi dibanding negara maju karena lebih fokus pada penggunaan energi fosil. Sementara sumber energi yang tidak mengandung rantai karbon seperti energi baru dan terbarukan terutama nuklir sebagai sumber energi berkapasitas besar masih sangat langka atau belum diterapkan. Model MESSAGE menghasilkan solusi optimum untuk memberi gambaran kepada pengguna berdasarkan *least cost*, namun dapat menghasilkan solusi optimum berdasarkan kebijakan yang

diterapkan di dalam model energi nasional atau regional. Jika kebijakan tidak diterapkan model akan bekerja memberikan gambaran tentang realitas dan konsekuensi yang mungkin akan dihadapi.



Gambar 7. Proyeksi intensitas emisi CO<sub>2</sub>

## KESIMPULAN

Sistem energi khususnya listrik di Indonesia membutuhkan penambahan kapasitas terpasang hingga 257 ribu MW untuk sistem Sujamali dan 67 MW untuk Luar Sujamali hingga tahun 2060. Sebagai konsekuensinya akan terjadi pelepasan gas buang khususnya emisi CO<sub>2</sub> dalam jumlah yang besar yang akan berdampak pada masalah kelestarian lingkungan global. Emisi tahunan CO<sub>2</sub> dari system Sujamali diproyeksikan akan meningkat dari 103,31 juta ton pada tahun 2015 menjadi 1,26 miliar ton pada tahun 2060. Sedangkan dari system Luar Sujamali meningkat dari 15,73 juta ton pada tahun 2020 menjadi 592,38 juta ton pada tahun 2060. Intensitas emisi CO<sub>2</sub> mengalami peningkatan pula pada system Luar Sujamali jika belum terlaksana peningkatan kapasitas pembangkit bebas emisi seperti energi baru dan terbarukan secara signifikan.

Proyeksi emisi CO<sub>2</sub> ke masa depan menggambarkan potensi dampak lingkungan yang cukup tinggi berdasarkan kecenderungan konsumsi energi dan jenis bahanbakar yang digunakan. Masalah kelangkaan dan harga sumber energi bebas emisi juga membuat ketergantungan pada bahanbakar fosil dan tingginya angka intensitas emisi CO<sub>2</sub>.

Sebagai upaya untuk mengurangi intensitas emisi diperlukan kebijakan untuk mendorong penggunaan sumber energi selain fosil yang dapat berupa energi baru dan terbarukan. Mengingat energi nuklir adalah salah satu sumber energi baru bebas emisi CO<sub>2</sub> dengan kemampuan pembangkitan skala besar, maka penerapannya perlu dipertimbangkan untuk menurunkan intensitas emisi CO<sub>2</sub> dan polutan lainnya dari bahannakar fosil ke lingkungan.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] -, "Future climate projections : Five graphs from three reports." The World Meteorological Organisation's greenhouse gas bulletin, pp. 1–6, 2018.
- [2] R. Derwent and S. Park, "Global environmental impacts of the hydrogen economy Peter Simmonds and Simon O' Doherty Alistair Manning and William Collins David Stevenson," *Int. J. Nucl. Hydrog. Prod. Appl. Vol. 1, No. 1, 2006*, vol. 1, no. 1, 2006.
- [3] R. D. (ENV) D. van V. (PBL) Virginie Marchal and B. M. (ENV) J. van V. (PBL) Christa Clapp, Jean Château, Eliza Lanzi, *OECD Environmental Outlook to 2050 November 2011*, no. November. OECD, 2011.
- [4] J. Zhou *et al.*, "Future trends of global atmospheric antimony emissions from anthropogenic activities until 2050," *Atmos. Environ.*, vol. 120, no. 19, pp. 385–392, 2015.
- [5] E. Liun, "Proyeksi Neraca Energi Indonesia Hingga Tahun 2060," in *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir 2017 Makassar, 12 Oktober 2017*, 2017, pp. 189–198.

- [6] -, *Outlook Energi Indonesia 2016*. Jakarta: Sekretariat Jenderal Dewan Energi Nasional 2016 ONL, 2016.
- [7] L. Fauzielly, U. Padjadjaran, B. Muljana, and U. Padjadjaran, "Studi Perbandingan Karakteristik Kimia Dan Petrografi Batubara Lapangan X, Cekungan Sumatera Selatan dan Lapangan Y Cekungan Sumatera Tengah Indonesia," *Bul. Sumber Daya Geol. Vol. 12 Nomor 2 - 2017* 87 - 102, no. October, 2017.
- [8] -, "Komposisi , Komponen Minyak Bumi , Bahan Bakar Minyak." pp. 4–7, 2018.
- [9] S. Faramawy, T. Zaki, and A. A. Sakr, "Natural gas origin , composition , and processing : A review Journal of Natural Gas Science and Engineering," *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, vol. 34, no. July, pp. e649–e656, 2016.
- [10] W. J. Davis, "The Relationship between Atmospheric Carbon Dioxide Concentration and Global Temperature for the Last 425 Million Years." 2017.
- [11] -, "Projected growth in CO2 emissions driven by countries outside the OECD." US Energy Information Administration, pp. 2016–2019, 2018.
- [12] -, *Model for Energy Supply Strategy Alternatives*, no. June. Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency (IAEA), 2007.
- [13] F. A. Atiku, E. J. S. Mitchell, J. M. Jones, A. Williams, and K. D. Bartle, "The Impact of Fuel Properties on the Composition of Soot Produced by the Combustion of Residential Solid Fuels in a Domestic Stove," *Fuel Process. Technol.*, vol. 151, pp. 117–125, 2016.

## **DISKUSI/TANYA JAWAB**

### **1. PERTANYAAN**

Bagaimana kaitannya dengan protocol Kyoto tentang emisi karbon dari sector listrik dan industry?

#### **JAWABAN**

Dampak emisi CO2 bersifat global yaitu pemanasan lapisan atmosfer bumi yang berdampak pada pencairan tumpukan es di Kawasan kutub-kutub bumi dan puncak-puncak gunung yang mengganggu keseimbangan alam. Hal ini berakibat tenggelamnya sebagian daratan dan pulau-pulau kecil yang menimbulkan kesengsaraan pada penghuninya. Kaitan yang relevan dengan protocol Kyoto adalah penerapan pajak emisi karbon (carbon tax) atas kelebihan kadar karbon yang dilepaskan.

### **2. PERTANYAAN**

Apakah Indonesia mempunyai potensi akan terkena sanksi dari protocol Kyoto?

#### **JAWABAN**

Benar Indonesia mempunyai potensi dalam terkena sanksi dari atas kelebihan kuota emisi CO2 hingga tahun 2060, karena ada kecenderungan penggunaan batu bara dalam kuantitas yang besar.

Halaman ini sengaja di kosongkan

## **KAJIAN BIAYA EKSTERNAL FASILITAS NUKLIR REAKTOR DAYA EKSPERIMENTAL AKIBAT SEBARAN EFLUEN RADIONUKLIDA DI SUNGAI CISADANE**

**Sufiana Solihat<sup>1</sup>, Abimanyu Bondan WS<sup>2</sup>**

*<sup>1,2</sup> Pusat Kajian Sistem Energi Nuklir, Badan Tenaga Nuklir Nasional,  
Jl. Kuningan Barat, Mampang Prapatan, Indonesia  
email: ssufiana@batan.go.id*

### **ABSTRAK**

**KAJIAN BIAYA EKSTERNAL FASILITAS NUKLIR REAKTOR DAYA EKSPERIMENTAL AKIBAT SEBARAN EFLUEN RADIONUKLIDA DI SUNGAI CISADANE.** Kajian ekonomi untuk menghitung biaya kerugian dari dampak kesehatan yang mungkin terjadi akibat lepasan yang berasal dari fasilitas nuklir Reaktor Daya Eksperimental (RDE) di Sungai Cisadane telah dilakukan. Tujuan kajian adalah untuk mengetahui biaya eksternal dari operasi normal RDE, yang rencananya akan dibangun di kawasan Pusat Ilmu Pengetahuan dan Teknologi (PUSPIPTEK) Serpong yang dampaknya dikhususkan pada radionuklida yang tersebar melalui badan air. Biaya eksternal yang dihitung adalah biaya kerugian dari dampak kesehatan yang difokuskan pada risiko kanker dan penyakit turunan spesifik yang diterima oleh masyarakat di sekitar RDE akibat ingesti radionuklida dari konsumsi produk pangan yang memanfaatkan air Sungai Cisadane. Metode yang digunakan adalah membuat model instalasi RDE dengan menggunakan perangkat lunak SIMPACTS. Hasil perhitungan SIMPACTS berupa dosis kolektif dan kemudian dikonversi menjadi biaya kerugian dari risiko kanker fatal dan non-fatal, serta penyakit turunan akibat penyebaran radionuklida tersebut. Hasil kajian menunjukkan nilai biaya eksternal yang sangat kecil, diantaranya untuk risiko kanker fatal sebesar 0,00003317 US\$/tahun, untuk risiko kanker non-fatal sebesar 0,00008666 US\$/tahun, dan untuk risiko penyakit turunan spesifik sebesar 0,0002171 US\$/tahun. Berdasarkan nilai kerugian tersebut, dapat diketahui bahwa RDE secara signifikan tidak menimbulkan kerugian akibat dampak kesehatan

Kata kunci: RDE, biaya eksternal, kanker, radionuklida, SIMPACT.

### **ABSTRACT**

**STUDY OF EXTERNAL COST FOR EXPERIMENTAL POWER REACTOR NUCLEAR FACILITY DUE TO RADIONUCLIDE EFFLUENT DISCHARGE IN CISADANE RIVER.** An economic study for calculating the cost of losses from possible health impacts resulting from releases derived from the experimental power reactor (RDE) has been exist. The purpose of this study is to find out external costs of normal RDE operations are planned to be built in PUSPIPTEK Serpong area whose impact is devoted to radionuclides scattered through water bodies. The calculated external costs are the costs of losses from the health impacts for the area around the RDE. The health impact is focused on the risk of cancer and specific hereditary impact received by populations around the RDE due to radionuclide ingestion from consumption of food products utilizing Cisadane River water. The method used is to create an RDE installation model using SIMPACTS software. The results of the calculation of SIMPACTS are collective doses and then converted to the cost of losses from fatal and non-fatal cancer risk, and also hereditary diseases due to the spread of the radionuclides. The final results show the small value of external costs for fatal cancer risk of 0,00003317 US \$/year, for non-fatal cancer risk of 0,00008666 US \$/year, and for specific disease-specific risk of 0,0002171 US \$/year. Based on the value of such losses, it can be seen that the RDE significantly does not cause harm due to health impact.

Keyword: RDE, external cost, cancer, radionuclide, SIMPACTS.

### **PENDAHULUAN**

Pembangunan pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) di Indonesia masih belum terlaksana karena masih banyak masyarakat yang mengkhawatirkan tentang keamanannya dan belum yakin Indonesia mampu membangun dan mengoperasikan reaktor nuklir dengan aman. Selain itu juga fenomena “*not in my back yard*” (NIMBY) di masyarakat tentang

fasilitas nuklir. Kekhawatiran tersebut mengakibatkan penolakan di berbagai daerah, terutama yang daerahnya akan dibangun PLTN. Oleh karena itu, Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) memprakarsai pembangunan Reaktor Daya Eksperimental (RDE) yang bertujuan mendemonstrasikan PLTN kecil yang beroperasi secara aman [1], dengan sangat memperhatikan aspek lingkungan terutama tentang pencemaran air yang termaktub pada peraturan daerah dan peraturan pemerintah terkait.

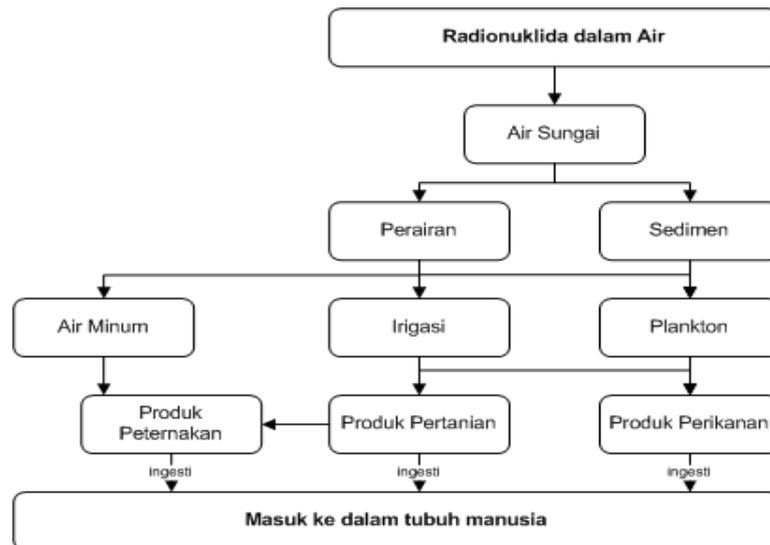
RDE merupakan jenis reaktor nuklir Generasi IV yang merupakan pengembangan dari generasi-generasi sebelumnya, diantaranya dalam aspek keberlanjutan, ekonomi, keselamatan dan keandalan, serta pencegahan pemanfaatan senjata nuklir dan proteksi fisik. Keunggulan dari reaktor nuklir Generasi IV diantaranya penggunaan bahan bakar yang lebih efektif dan minim pengelolaan limbah nuklir jangka pendek maupun jangka panjang [2]. Limbah yang tersimpan juga mempunyai reaktivitas yang semakin menurun dan aman di *spent fuel* [3]. Secara teknologi, RDE memiliki kesamaan dengan reaktor jenis *High Temperature Reactor* yang dikembangkan oleh Cina, yang bernama HTR-10. Reaktor ini menghasilkan daya 10 MW, dengan menggunakan bahan bakar jenis *pebble bed* dan bermoderator grafit. Baik RDE maupun HTR-10 dirancang dengan mengadaptasi teknologi reaktor pendahulunya yang berasal dari Jerman, menggunakan pendingin gas helium bertekanan 3 MPa dengan temperatur masuk dan keluar masing-masing 250 dan 700°C [4]. Analisis inventory RDE menunjukkan bahwa aktivitas radionuklida RDE lebih kecil dari batas dosis yang diijinkan badan pengawas [5].

Menurut *Nuclear Energy Agency* (NEA) (2003), biaya eksternal adalah biaya yang ditanggung oleh masyarakat secara keseluruhan, bukan oleh konsumen barang, produk, atau jasa, yang mencegah mekanisme pasar beroperasi secara efisien melalui harga yang memadai, sehingga dapat merugikan optimalisasi ekonomi, sosial dan lingkungan [6]. Penghitungan biaya eksternal dari suatu teknologi pembangkit listrik merupakan hal yang penting. Hal ini karena pada umumnya pembangunan pembangkit listrik dapat memakan waktu yang cukup lama dan memiliki pengaruh tertentu, yang dapat menimbulkan dampak jangka panjang terhadap lingkungan dan pertumbuhan ekonomi [7].

Nilai biaya eksternal dapat diperoleh dengan mempertimbangkan kejadian dampak kesehatan masyarakat berdasarkan besarnya dosis yang diterima, serta biaya untuk kejadian dampak kesehatan tersebut. *European Commission* melalui *ExternE Project* telah melakukan pendekatan untuk menghitung biaya eksternal dari pembangkit listrik. Pendekatan tersebut dikenal dengan *EcoSense Model*, yang mengintegrasikan perhitungan dosis kolektif berdasarkan analisis jalur dampak dengan mempertimbangkan fungsi respon dosis. Analisis jalur dampak merupakan pendekatan *bottom-up*, dimana benefit dan biaya lingkungan diestimasi melalui suatu jalur dari sumber emisi, baik melalui perubahan kualitas udara, tanah, maupun air, terhadap dampak fisik sebelum dinyatakan dalam bentuk biaya moneter [8]. Pendekatan inilah yang diadopsi oleh SIMPACTS sebagai perangkat lunak yang dirilis secara resmi oleh *International Atomic Energy Agency* (IAEA) dan telah digunakan oleh negara-negara anggota untuk kepentingan penelitian dan pengembangan untuk menghitung biaya eksternal dari operasi rutin suatu pembangkit listrik pada kondisi normal. Selain itu juga, SIMPACTS biasa digunakan untuk kajian-kajian mengenai biaya eksternal pembangkit listrik, baik pembangkit listrik berbahan bakar fosil, nuklir, maupun pembangkit listrik tenaga air [9].

Berdasarkan Peraturan Kepala Badan Pegawai Tenaga Nuklir (BAPETEN) Nomor 7 Tahun 2013 mengenai Nilai Batas Radioaktivitas Lingkungan, jalur perpindahan radionuklida di badan air (sungai) digambarkan dalam skema (Gambar 1).

Pada kajian ini dilakukan pemodelan instalasi RDE dengan SIMPACTS untuk mengetahui biaya eksternal dari operasi normal RDE yang rencananya akan dibangun di kawasan Pusat Penelitian Ilmu Pengetahuan dan Teknologi (PUSPIPTEK) Serpong. Biaya yang dihitung khusus memperhitungkan dampak lepasan radionuklida yang terlepas ke badan air dan masuk ke dalam tubuh melalui ingesti produk pangan yang memanfaatkan air sungai, seperti ditunjukkan pada alur proses transport radionuklida hingga masuk ke dalam tubuh yang ditampilkan pada Gambar 1. Badan air yang menjadi media lepasan radionuklida adalah Sungai Cisadane yang berada dekat dengan lokasi tapak RDE.



Gambar 1. Jalur perpindahan radionuklida di badan air/sungai [10]

## METODOLOGI

Perhitungan biaya eksternal dari fasilitas nuklir RDE akibat potensi sebaran radionuklida ke badan air dalam penelitian ini dilakukan di Kantor Pusat BATAN dengan menggunakan perangkat lunak SIMFACTS. Tahapan yang dilakukan antara lain penentuan wilayah terkena dampak, pengumpulan dan pengolahan data, serta menjalankan program SIMFACTS.

### Penentuan Wilayah Terkena Dampak

Sumber pencemar diasumsikan berasal dari operasi rutin RDE yang beraktivitas secara normal yang akan dibangun di kawasan PUSPIPTEK yang terletak di Kecamatan Setu, Kota Tangerang Selatan, Provinsi Banten. Lingkup wilayah yang dikaji dibatasi hanya untuk wilayah Kecamatan Setu, beserta aliran Sungai Cisadane yang membatasi daerah tersebut. Selain akan adanya fasilitas RDE, di daerah telitian juga terdapat fasilitas nuklir yang telah ada sebelumnya berupa reaktor serba guna yang masih termasuk aman di bawah dosis yang ditentukan [11]. Analisis Peta wilayah kajian dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2 Peta wilayah kajian, Kecamatan Setu, Kota Tangerang Selatan

Selain itu juga perlu diketahui pemanfaatan air sungai untuk kebutuhan masyarakatnya. Laporan Evaluasi Tapak (LET) RDE Aspek Dispersi, pemanfaatan air Sungai Cisadane untuk keperluan irigasi pertanian dan perikanan oleh penduduk di

Kecamatan Setu [12], merupakan informasi penting sebagai masukan awal pada program SIMPACTS, yang akan digunakan pada pemodelan sebaran radionuklida untuk perhitungan konsentrasi pencemar pada titik pemanfaatan air sungai. Tampilan program SIMPACTS pada tahap pengisian data masukan awal program, ditampilkan pada Gambar 3.

Gambar 3 Tampilan program SIMPACTS: badan air dan pemanfaatannya

### Pengumpulan Data, Asumsi, dan Pengolahan Data

Data sekunder mengenai nilai tertinggi lepasan efluen cair Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy berdasarkan LET RDE Aspek Dispersi digunakan. Lepasannya yang berasal dari deposisi radionuklida yang terlepas ke udara diabaikan karena nilainya yang sangat kecil dibandingkan daratan dan besarnya pengaruh pengenceran akibat debit aliran sungai yang cukup besar. Lepasannya efluen cair dari RDE diasumsikan memiliki debit 30 m<sup>3</sup>/jam. Data aktivitas radionuklida yang terlepas ke badan air sungai Cisadane berdasarkan LET RDE yang ditunjukkan pada data di Aspek Dispersi ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Radionuklida yang terlepas ke badan air [12]

No	Jenis Radionuklida	Aktivitas (Bq/detik)
1	Cs-134	1,75989 x 10 <sup>-9</sup>
2	Cs-137	6,69077 x 10 <sup>-9</sup>
3	I-131	5,99315 x 10 <sup>-4</sup>

Dari data masukan tersebut, dihitung konsentrasi radionuklida yang memasuki badan air dengan persamaan berikut:

$$C_i = C_i^0 = \frac{Q_i}{F} \quad (1)$$

dimana,

$C_i$  : konsentrasi radionuklida  $i$  dalam air yang tidak tersaring (Bq/m<sup>3</sup>)

$C_i^0$  : konsentrasi radionuklida  $i$  yang bermuara ke sungai (Bq/m<sup>3</sup>)

$Q_i$  : *discharge rate* rata-rata tahunan untuk radionuklida  $i$  (Bq/detik)

$F$  : laju alir dari efluen cair (m<sup>3</sup>/detik).

Selain itu, digunakan data masukan mengenai jarak pemanfaatan air dan parameter sungai yang menjadi media sebaran pencemar. Berdasarkan hasil pengamatan, jarak dari titik masuknya lepasan efluen cair RDE ke titik pemanfaatan air sungai untuk tangkapan irigasi pertanian dan perikanan, masing-masing sejauh 1270 m dan 1000 m. Selanjutnya, berdasarkan LET RDE Aspek Dispersi mengenai parameter sungai, dinyatakan bahwa lebar, kedalaman aliran, dan debit aliran air Sungai Cisadane tahunan terendah selama 30 tahun terakhir masing-masing sebesar 58,23 m; 0,91 m; dan 24,9 m<sup>3</sup>/detik. Konsentrasi sedimen tersuspensi di dalam air Sungai Cisadane adalah 0,057 g/L [12]. Berdasarkan hasil kajian dalam LET RDE Aspek Hidrologi, dinyatakan bahwa sifat batuan dasar di daerah aliran Sungai Cisadane secara umum merupakan jenis batuan sedimen, dengan jenis tanah lempung, dan air sadah [13].

Data-data tersebut menjadi data masukan untuk program SIMPACTS, dan selanjutnya dilakukan pengolahan data secara otomatis oleh program tersebut. Adapun persamaan yang digunakan dalam perhitungannya adalah sebagai berikut:

$$A^r = \frac{1,5 \times D \times x}{B^2} \quad (2)$$

$$C_i = \frac{Q_i}{q} \exp\left(\frac{-\lambda_i \times x}{u}\right) \times P^r \quad (3)$$

dimana,

- $A^r$  : indeks pencampuran parsial
- $B$  : lebar minimum sungai rata-rata dalam 30 tahun terakhir (m)
- $D$  : kedalaman minimum sungai rata-rata dalam 30 tahun terakhir (m)
- $x$  : jarak antara titik masuknya efluen ke sungai dengan titik pemanfaatan air sungai (m)
- $q$  : debit sungai rata-rata (m<sup>3</sup>/detik)
- $\lambda_i$  : konstanta peluruhan radioaktif untuk radionuklida  $i$  (s<sup>-1</sup>)
- $u$  : laju alir air sungai (m/s)
- $P^r$  : koefisien pencampuran parsial untuk sungai

### Perhitungan Dosis

Pada perhitungan dosis, perlu diketahui mengenai reseptor dan pemanfaatan air yang dilakukan. Pada kajian ini, yang bertindak sebagai reseptor (penerima dampak) adalah penduduk di wilayah Kecamatan Setu, Kota Tangerang Selatan, yang berjumlah 65.742 orang [14]. Data tingkat konsumsi pangan rata-rata untuk setiap orang per tahun berdasarkan statistik konsumsi pangan dan statistik sumber daya laut dan pesisir tahun 2017, sebagaimana ditampilkan pada Tabel 2.

Pangan yang dikonsumsi	Jumlah
Tanaman biji-bijian, sayuran dan buah	174,18 kg
Susu	3,51 L
Daging	7,71 kg
Ikan segar	41,11 kg

Profil irigasi diasumsikan mengikuti nilai default yang telah disediakan dalam SIMPACTS, diantaranya durasi waktu irigasi dalam setahun selama 250 hari, jumlah hari untuk irigasi aktual sebanyak 200 hari, kuantitas air yang digunakan dalam sehari sebanyak 50 L/m<sup>2</sup>.hari, dan fraksi tahunan hewan mengkonsumsi vegetasi padang rumput segar sebesar 0,8.

Adapun persamaan yang digunakan dalam program SIMPACTS untuk perhitungan dosis adalah sebagai berikut:

$$CR_{ipxy} = flx_{ixy} \times f_{ip} \quad (4)$$

$$AC_{ipxy}^{ing} = CR_{ipxy} \times f_{ip}^{rem} \times f_p^{ed} \times prd_{pxy} \times 1000 \quad (5)$$

$$E_{ipxy}^{ing} = AC_{ipxy}^{ing} \times EDE_i^{ing} \quad (6)$$

$$E_p^{ing} = (1 - ex) \sum_{x=1}^{NX} \sum_{y=1}^{NY} E_{pxy}^{ing} \quad (7)$$

$$E_p^{ing} = E^{ing} \times \frac{\rho_{xy}}{\sum_{x=1}^{NX} \sum_{y=1}^{NY} \rho_{xy}} \quad (8)$$

dimana,

- $CR_{ipxy}$  : tingkat kontaminasi produk  $p$  oleh radionuklida  $i$  di wilayah paparan (Bq/kg)
- $flx_{ixy}$  : total flux deposisi radionuklida  $i$  di wilayah paparan (Bq/m<sup>2</sup>.detik)
- $f_{ip}$  : koefisien transfer radionuklida  $i$  untuk produk  $p$  yang terintegrasi lebih dari 100.000 tahun (Bq/kg.Bq.m<sup>2</sup>.detik)
- $AC_{ipxy}^{ing}$ : aktivitas kumulatif untuk produk pangan  $p$  yang terkontaminasi radionuklida  $i$  di wilayah dampak (Bq/tahun)
- $f_{ip}^{rem}$  : fraksi radioaktif nuklida  $i$  yang tersisa dalam produk  $p$  pada saat dikonsumsi (%)
- $f_p^{ed}$  : fraksi produk pertanian  $p$  yang dapat dikonsumsi (%)
- $prd_{pxy}$  : produksi tahunan produk pangan  $p$  di wilayah dampak (ton/tahun)
- $E_{ipxy}^{ing}$  : dosis total dari produksi produk pangan  $p$  yang terkontaminasi radionuklida  $i$  di wilayah dampak (Sv/tahun)
- $EDE_i^{ing}$  : dosis ekivalen efektif selama 50 tahun dari konsumsi pangan yang terkontaminasi radionuklida  $i$  (Sv/Bq)
- $E_{pxy}^{ing}$  : dosis total dari produksi produk pangan  $p$  yang terkontaminasi oleh semua jenis radionuklida, kecuali H-3 dan C-14 di wilayah dampak (Sv/tahun)

- $E_p^{ing}$  : total dosis kolektif untuk seluruh penduduk local dari produksi produk pangan p (man Sv)  
 $ex$  : prosentase produksi produk pangan p yang diekspor dan tidak dikonsumsi secara local (%)  
 $E^{ing}$  : total dosis kolektif untuk seluruh penduduk local dari konsumsi semua produk local dan produk pangan yang terkontaminasi (man Sv)  
 $\rho_{xy}$  : kepadatan penduduk di wilayah paparan (orang/km<sup>2</sup>)

### Perhitungan Nilai Ekonomi

Tabel 3 Faktor resiko kejadian dampak kesehatan dan nilai ekonomi spesifiknya [17]–[19]

Dampak	Faktor resiko spesifik (cases per man Sv)	Nilai ekonomi spesifik (US\$ constant prices of year 2000)
Kanker fatal	0,05	772,11
Kanker non-fatal	0,12	840,52
Efek turunan spesifik	0,01	25271,60

Data input dampak diantaranya kanker fatal, kanker non-fatal, dan penyakit turunan dalam Tabel 3 dimasukkan ke dalam perhitungan, mengikuti default yang bersumber dari rekomendasi ICRP [17]–[19]. Persamaan yang digunakan dalam program SIMPACTS untuk perkiraan kejadian dampak kesehatan manusia dan evaluasi ekonomi adalah sebagai berikut:

$$I_k = E^{total} \times RF_k \quad (9)$$

$$ECY_k = I_k \times U_k \quad (10)$$

dimana,

$I_k$  : Total kejadian dampak kesehatan (kasus/tahun)

$E^{total}$  : Total dosis efektif kolektif pada seluruh penduduk local (man Sv)

$RF_k$  : Faktor resiko untuk dampak kesehatan (kasus/man Sv)

$ECY_k$  : Biaya eksternal tahunan dari dampak kesehatan (US\$/tahun)

$I_k$  : Total kejadian dampak kesehatan (kasus/tahun)

$U_k$  : Biaya untuk suatu kejadian dampak kesehatan (US\$/kasus)

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada perhitungan tahap pertama menggunakan SIMPACTS telah diperoleh nilai konsentrasi radionuklida dalam air yang dikonsumsi oleh masyarakat pada titik pemanfaatan air sungai untuk kebutuhan sehari-hari. Persentase penduduk pengguna air Sungai Cisadane untuk irigasi pertanian terdapat di tiga kelurahan, diantaranya Kelurahan Kranggan mencapai 93,90%, Muncul 29,86%, dan Setu 0,71%. Selain itu, penduduk di ketiga kelurahan tersebut juga memanfaatkan air sungai untuk keperluan perikanan dengan persentase penggunaan air sungai di Kelurahan Kranggan mencapai 95,73%, Muncul 27,15%, dan Setu 0,71% [12].

Menurut Sandell (2004), radionuklida Ag-110m, Cs-134, dan Cs-137 merupakan lepasan penting yang berasal dari teras reaktor pada kondisi operasi normal, sebagaimana yang terjadi pada *Gas Turbine-Modular Helium Reactor* (GT-MHR) dan *Pebble Bed Modular Reactor* (PBMR). Selain itu, radionuklida yang terakumulasi di dalam pendingin primer selama operasi normal, khususnya I-131, menjadi sumber utama untuk postulasi kecelakaan [4]. Berdasarkan Laporan Evaluasi Tapak RDE Aspek Dispersi, lepasan radionuklida dari operasi rutin RDE pada kondisi normal diperkirakan terdiri dari beberapa jenis, diantaranya Cs-134, Cs-137, dan I-131 [12]. Hasil perhitungan konsentrasi radionuklida dalam air yang digunakan untuk irigasi dan perikanan ditampilkan pada Tabel 4.

Proses perjalanan radionuklida melalui air permukaan/sungai mengalami serangkaian proses fisika dan kimia yang mempengaruhi perpindahan pergerakannya dari titik lepasan. Proses-proses tersebut diantaranya dispersi secara adveksi dan turbulan, proses adsorpsi dan desorpsi sedimen, proses lain seperti peluruhan radionuklida, serta mekanisme yang terjadi di sungai akan menurunkan konsentrasi pencemar di dalam air.

Tabel 4 Konsentrasi radionuklida dalam air yang dikonsumsi

Radionuklida	Konsentrasi (Bq/m <sup>3</sup> )		Baku Mutu [10] (Bq/m <sup>3</sup> )
	Tangkapan air untuk irigasi	Perikanan	
Cs-134	$2,387 \times 10^{-10}$	$2,610 \times 10^{-10}$	$1,7 \times 10^2$
Cs-137	$9,075 \times 10^{-10}$	$9,921 \times 10^{-10}$	$2,5 \times 10^2$
I-131	$8,107 \times 10^{-5}$	$8,868 \times 10^{-5}$	$6,4 \times 10^3$

Berdasarkan hasil perhitungan konsentrasi pada Tabel 4, terlihat bahwa konsentrasi radionuklida yang terdapat dalam air yang digunakan untuk perikanan, sedikit lebih besar dibanding konsentrasi radionuklida di titik tangkapan air untuk irigasi. Nilai konsentrasi radionuklida di titik pemanfaatan air sungai tersebut, baik pada titik tangkapan air untuk irigasi maupun perikanan, masih jauh di bawah nilai batas radioaktivitas lingkungan yang tercantum dalam Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 7 tahun 2013 tentang Nilai Batas Radioaktivitas Lingkungan menetapkan Baku Tingkat Radioaktivitas di Lingkungan.

Tahap kedua perhitungan dengan SIMFACTS telah dilakukan untuk mengetahui nilai dosis kolektif masyarakat dari konsumsi produk pangan yang diperkirakan telah terkontaminasi radionuklida akibat pemanfaatan air Sungai Cisadane. Dosis kolektif efektif yang diterima masyarakat selama satu tahun ditampilkan pada Tabel 5.

Tabel 5 Dosis kolektif

Jalur paparan dosis	Dosis (man Sv/tahun)
Tanaman biji-bijian, sayur, dan buah	$5,386 \times 10^{-7}$
Susu	$4,213 \times 10^{-8}$
Daging	$6,743 \times 10^{-8}$
Ikan segar	$2,110 \times 10^{-7}$
Total dosis kolektif	$8,592 \times 10^{-7}$

Nilai total dosis kolektif yang ditampilkan pada Tabel 4 merupakan nilai total dosis untuk seluruh penduduk lokal (reseptor) akibat konsumsi produk pangan yang terkontaminasi radionuklida. Dalam kasus ini, penduduk lokal yang dimaksud adalah seluruh warga Kecamatan Setu, Kota Tangerang Selatan. Dari hasil perhitungan tersebut, dapat diketahui nilai dosis efektif yang diterima setiap orang yakni sebesar  $1.307 \times 10^{-8}$  mSv/tahun, dengan asumsi bahwa setiap orang mendapatkan dosis yang sama. Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013 tentang Proteksi dan Keselamatan Radiasi dalam Pemanfaatan Tenaga Nuklir menetapkan bahwa nilai batas dosis untuk anggota masyarakat sebesar 1 mSv/tahun [20]. Jika dibandingkan dengan nilai batas dosis tersebut, nilai dosis masyarakat yang mengkonsumsi produk pangan yang memanfaatkan air Sungai Cisadane jauh lebih kecil.

Dampak kesehatan yang dapat terjadi setelah terpapar radiasi pengion diatur oleh mekanisme biologis yang berbeda dan telah dikelompokkan menjadi dua kategori, yaitu efek deterministik dan efek stokastik. Efek deterministik adalah efek yang langsung terlihat dan hanya muncul jika dosis radiasinya melebihi suatu batas tertentu. Selain itu, dapat juga terjadi dalam jangka waktu yang agak lama setelah terkena radiasi, dan umumnya tidak berakibat fatal, misalnya katarak atau kerusakan kulit yang dapat terjadi dalam waktu beberapa minggu setelah terkena dosis 5 Sv atau lebih. Efek stokastik adalah efek radiasi yang tidak langsung terlihat, akibat paparan radiasi berdos rendah dalam jangka waktu yang lama, sehingga menyebabkan sel-sel tubuh mengalami kerusakan dalam jangka waktu yang sangat lama, mungkin berpuluh-puluh tahun kemudian. Contoh penyakit yang termasuk dalam kategori ini adalah kanker, dan tidak menutup kemungkinan terjadi penyakit serius tertentu yang dapat menyerang turunan dari orang yang terpapar dosis radiasi jangka panjang tersebut [21]. Dalam studi ini, dampak kesehatan difokuskan pada efek stokastik, dimana penyakit yang diperhitungkan diantaranya kanker fatal dan non-fatal, dan penyakit turunan spesifik.

Hasil perhitungan tahap selanjutnya adalah mengenai kejadian penyakit yang dapat muncul akibat paparan dosis radiasi, dan nilai moneternya setelah dikonversi dalam bentuk nilai uang, sebagaimana ditampilkan pada Tabel 6.

Tabel 6 Dampak kesehatan dan biaya kerugian

Dampak kesehatan	Kejadian dampak (kasus/tahun)	Biaya kerugian (US\$/tahun)
Kanker fatal	$4,296 \times 10^{-8}$	$3,317 \times 10^{-5}$
Kanker non-fatal	$1,031 \times 10^{-7}$	$8,666 \times 10^{-5}$
Penyakit turunan spesifik	$8,592 \times 10^{-9}$	$2,171 \times 10^{-4}$
Total dampak	$1,547 \times 10^{-7}$	$3,370 \times 10^{-4}$

Hasil tersebut menunjukkan kejadian penyakit dan biaya yang harus ditanggung masyarakat Kecamatan Setu. Dosis kolektif untuk masyarakat tersebut digunakan untuk menghitung perkiraan jumlah dampak kesehatan. Metode ini menggunakan faktor risiko yang direkomendasikan oleh ICRP, dengan dampak yang terjadi diestimasi dengan mengaplikasikan *Dose Response Function* (DRF)/fungsi respon dosis [22]. DRF menggambarkan hubungan antara tingkat dosis terhadap dampak, yang dalam kajian mengenai dampak kesehatan diasumsikan terjadi hubungan yang linier antara tingkat dosis dan dampak negatifnya terhadap kesehatan [1]. Hasil perhitungan jumlah kejadian penyakit turunan sepuluh kali lebih kecil dari jumlah kejadian kanker non-fatal, dan lima kali lebih kecil dari jumlah kejadian kanker fatal, ditunjukkan pada Tabel 6.

Selanjutnya tahap terakhir yakni menerjemahkan jumlah kejadian dampak kesehatan dalam nilai ekonomi, yang dikumpulkan dalam suatu satuan yang umum digunakan dengan cara mengalikan jumlah kejadian dampak dengan satuan biaya dampak tersebut. Satuan biaya pada program SIMPACTS telah tersedia dalam bentuk US \$ dengan menggunakan standar nilai uang Uni Eropa. Konversi satuan biaya ke nilai mata uang Indonesia dilakukan dengan membandingkan daya beli Indonesia terhadap Uni Eropa. Berdasarkan hasil perhitungan yang diperoleh, terlihat bahwa biaya kerugian akibat dampak penyakit turunan spesifik menunjukkan angka lebih besar dibanding biaya kerugian akibat dampak kesehatan lain. Nilai dari penyakit turunan jauh lebih kompleks karena hal ini tidak terjadi selama umur hidup orang yang terpapar. Efek akan terjadi selama beberapa generasi setelah paparan terjadi. Biaya dampak kesehatan biasanya memperhitungkan biaya pengobatan, upah dan kerugian yang dihasilkan, serta kemampuan individu untuk membayar pencegahan dampak tersebut [1].

Nilai biaya eksternal tersebut merupakan perkiraan biaya kerugian yang harus ditanggung masyarakat dan lingkungan dari operasi normal RDE, yang mana lepasan radionuklidanya khusus yang tersebar melalui Sungai Cisadane dan masuk ke dalam tubuh melalui jalur ingesti. Jalur paparan pencemar yang berdampak pada kesehatan masyarakat akibat lepasan radionuklida selain melalui ingesti juga dapat terjadi melalui imersi dan paparan eksternal radionuklida, serta inhalasi radionuklida yang tersebar di udara. Oleh dari itu, perlu dilakukan kajian lebih lanjut mengenai perhitungan biaya eksternal RDE dari jalur paparan lainnya itu.

## KESIMPULAN

Berdasarkan perhitungan biaya eksternal dari operasi rutin fasilitas nuklir RDE di Kawasan PUSPIPTEK Serpong akibat sebaran efluen radionuklida di Sungai Cisadane, diperoleh nilai biaya kerugian yang sangat kecil, yaitu akibat dampak kanker fatal sebesar 0,00003317 US\$/tahun, kanker non-fatal sebesar 0,00008666 US\$/tahun, dan dampak penyakit turunan sebesar 0,0002171 US\$/tahun. Nilai biaya ini dihitung berdasarkan kejadian dampak kesehatan dari dosis yang diterima masyarakat, yang berdasarkan perhitungan SIMPACTS berada jauh di bawah baku mutu yang ditetapkan. Biaya eksternal tersebut merupakan biaya yang tidak diperhitungkan dalam perencanaan dan operasional RDE, dan harus ditanggung masyarakat sebagai reseptor.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Kepala Bidang Kajian Infrastruktur, Ir. Sriyana, M.T., yang telah memeriksa makalah dan Dr. Suparman yang telah mendukung peningkatan kompetensi SDM melalui pelatihan E-learning SIMPACTS IAEA.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Solihat and W. L. Widodo, "Perkiraan Biaya Eksternal dari Fasilitas Nuklir RDE Menggunakan Software SIMFACTS," in *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir*, 2017.
- [2] Y. D. Anggoro, D. Dewi, A. T. Yuliyanto, and M. Prapatan, "Kajian Perkembangan PLTN Generasi IV," *J. Pengemb. Energi Nukl.*, vol. 15, pp. 69–79, 2013.
- [3] I. Husnayani and P. M. Udiyani, "Radionuclide Characteristics of RDE Spent Fuels," *J. Teknol. Reakt. Nukl. Tri Dasa Mega*, vol. 20, no. 2, p. 69, 2018.
- [4] L. Sandell, "A Review of Radionuclide Release from HTGR Cores During Normal Operation," Palo Alto, 2004.
- [5] S. Kuntjoro and P. M. Udiyani, "Analisis Inventori Reaktor Daya Eksperimental Jenis Reaktor Gas Temperatur Tinggi," *Urania*, vol. 22, no. 1, pp. 53–64, 2016.
- [6] Nuclear Energy Agency (NEA), "Nuclear Electricity Generation: What Are the External Costs?," Paris, 2003.
- [7] H. Chen, B.-J. Tang, H. Liao, and Y.-M. Wei, "A multi-period power generation planning model incorporating the non-carbon external costs: A case study of China," *Appl. Energy*, vol. 183, pp. 1333–1345, 2016.
- [8] European Commission, "External costs: Research results on socio-environmental damages due to electricity and transport," Brussels, 2003.
- [9] F. Mayasari, "Perhitungan Biaya Eksternal Pembangkit Listrik Tenaga Uap Studi Kasus: PLTU Paiton," Universitas Indonesia, 2012.
- [10] BAPETEN, *Perka BAPETEN No.7 Tahun 2013: Nilai Batas Radioaktivitas Lingkungan*. Indonesia: BAPETEN, 2013.
- [11] P. M. Udiyani, "Perhitungan Dispersi Zat Radioaktif Reaktor RSG-GAS pada Kondisi Operasi Normal pada Daya 30MW," in *PPI-PDIPTN 2006*, 2006, pp. 50–59.
- [12] Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN), "Laporan Evaluasi Tapak Reaktor Daya Eksperimental Kawasan PUSPIPTEK Serpong Aspek Dispersi," Jakarta, 2016.
- [13] Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN), "Laporan Evaluasi Tapak Reaktor Daya Eksperimental Kawasan PUSPIPTEK Serpong Aspek Hidrologi," Jakarta, 2016.
- [14] BPS Kota Tangerang Selatan, "Kecamatan Setu Dalam Angka 2016." BPS Kota Tangerang Selatan, Tangerang Selatan, 2016.
- [15] Pusat Data dan Informasi Pertanian, "Statistik Konsumsi Pangan Tahun 2017," Jakarta, 2017.
- [16] Badan Pusat Statistik, "Statistik Sumber Daya Laut dan Pesisir 2018," Jakarta, 2018.
- [17] J. I. Levy, J. D. Spengler, D. Hlinka, D. Sullivan, and D. Moon, "Using CALPUFF to evaluate the impacts of power plant emissions in Illinois: Model sensitivity and implications," *Atmos. Environ.*, vol. 36, pp. 1063–1075, 2002.
- [18] G. Katata *et al.*, "Detailed source term estimation of the atmospheric release for the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident by coupling simulations of an atmospheric dispersion model with an improved deposition scheme and oceanic dispersion model," *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 15, pp. 1029–1070, 2015.
- [19] A. Hainoun, A. Almoustafa, and M. Seif Aldin, "Estimating the health damage costs of syrian electricity generation system using impact pathway approach," *Energy*, vol. 35, pp. 628–638, 2010.
- [20] BAPETEN, *Perka BAPETEN No.4 Tahun 2013: Proteksi dan Keselamatan Radiasi dalam Pemanfaatan Tenaga Nuklir*. Indonesia: BAPETEN, 2013, pp. 1–29.
- [21] European Commission, "Externalities of Energy: Nuclear," Brussels, 1995.
- [22] ICRP, "ICRP 103: The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection," 2007.

## DISKUSI/TANYA JAWAB:

### 1. PERTANYAAN

Mengenai presentasi luasan daerah terdampak di Kecamatan Setu, apakah memang seluas itu atau hanya di daerah Cisadane? Karena hal yang *dihighlight* adalah dosis akibat lepasan di sungai Cisadane.

### JAWABAN

Secara teori, lepasan radionuklida ke sungai akan mengalir dari hulu ke hilir di sepanjang aliran sungai tersebut. Akan tetapi wilayah kajian dibatasi hanya di

Kecamatan Setu karena merupakan lokasi rencana dibangunnya RDE, sehingga diperkirakan masyarakat di daerah tersebut terkena dampaknya karena lokasinya yang berdekatan. Maka dari itu, agar perhitungan lebih terfokus, maka data yang digunakan yakni data-data yang berlaku di Kecamatan Setu.

## KARAKTERISTIK NILAI PEMBATAS DOSIS DENGAN METODE QUARTILISASI DOSIS MAKSIMUM

Suhaedi Muhammad<sup>1</sup>, Rr.Djarwanti,RPS<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Pusat Teknologi Keselamatan Dan Metrologi Radiasi, Gedung B, Kawasan Nuklir Pasar Jum'at

<sup>2</sup> Pusat Teknologi Radioisotop Dan Radiofarmaka, Gedung 11, Kawasan Nuklir Serpong

email: suhaedi.muhammad62@gmail.com

### ABSTRAK

**KARAKTERISTIK NILAI PEMBATAS DOSIS DENGAN METODE QUARTILISASI DOSIS MAKSIMUM.** Salah satu kewajiban yang harus dilakukan oleh pemegang izin dalam rangka melindungi keselamatan dan kesehatan pekerja radiasi yang berada dalam tanggungjawabnya adalah menetapkan nilai pembatas dosis (NPD) sebagaimana ditetapkan di dalam pasal 36 Peraturan Pemerintah Nomor 33 Tahun 2007 tentang Keselamatan Radiasi Pengion Dan Keamanan Sumber Radioaktif serta pasal 41 dan pasal 42, Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013 tentang Proteksi dan Keselamatan Radiasi Dalam Kegiatan Pemanfaatan Tenaga Nuklir. Untuk menentukan besarnya NPD salah satunya dapat menggunakan metode quartilisasi dosis maksimum. Penentuan NPD dengan metode quartilisasi dosis maksimum bertumpu pada nilai rata-rata dosis pada zona antara kuartil atas ( $Q_3$ ) dan nilai datum dosis maksimum tertinggi. Untuk mengetahui karakteristik NPD pada zona antara kuartil atas ( $Q_3$ ) dan nilai datum dosis maksimum tertinggi telah dilakukan kajian. Dari contoh yang diberikan diperoleh hasil bahwa pada zona antara kuartil atas ( $Q_3$ ) dan nilai datum dosis maksimum tertinggi NPD bersifat linier kontinu terhadap perubahan nilai simpangan baku dosis dan bersifat linier logaritmik naturalis terhadap perubahan nilai sebaran normal dosis.

**Kata kunci :** karakteristik, pembatas dosis, quartilisasi

### ABSTRACT

**CHARACTERISTICS OF DOSE CONSTRAINTS WITH MAXIMUM DOSE QUARTILIZATION METHOD.** One of the obligations that the licensee must perform in order to protect the safety and health of the radiation workers under his responsibility is to determine the value of dose constraints (NPD) as set forth in Article 36 of Government Regulation No. 33/2007 concerning the Safety of Ionizing Radiation and Radioactive Source Security as well as Article 41 and Article 42 of the Regulation of the Head of BAPETEN Number 4 Year 2013 on Protection and Radiation Safety in the Activity of Nuclear Power Utilization. To determine the magnitude of NPD one can use the method of maximum dose quartilization. The determination of NPD by the maximum dose quartile method rests on the dose average value in the zone between the upper quartile ( $Q_3$ ) and the highest maximum dose datum value. To know the NPD characteristics in the zone between the upper quartile ( $Q_3$ ) and the highest maximum dose datum value has been studied. From the examples given, it is found that in the zone between the upper quartile ( $Q_3$ ) and the highest maximum dose datum value NPD is continuous linear to the change of standard deviation value of dose and naturalistic logarithmic linear to the change of normal dose distribution value.

Keywords: characteristics, dose constraints, quartilization

### PENDAHULUAN

Sebagaimana ditetapkan di dalam pasal 36 Peraturan Pemerintah Nomor 33 Tahun 2007 tentang Keselamatan Radiasi Pengion Dan Keamanan Sumber Radioaktif serta pasal 41 dan pasal 42 Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013 tentang Proteksi dan Keselamatan Radiasi Dalam Kegiatan Pemanfaatan Tenaga Nuklir, pemegang izin (PI) berkewajiban menetapkan nilai pembatas dosis (NPD) [1,2].

Penetapan NPD pekerja radiasi ini merupakan salah satu upaya yang dapat dilakukan oleh PI dalam rangka melindungi keselamatan dan kesehatan pekerja radiasi yang menjadi tanggungjawabnya.

Ada beberapa metode yang dapat digunakan oleh PI untuk menentukan besarnya NPD pekerja radiasi diantaranya adalah metode quartilisasi dosis maksimum dan metode relativitas median.

Penentuan NPD pekerja radiasi dengan menggunakan metode quartilisasi dosis maksimum didasarkan pada nilai rata-rata dosis maksimum (R) pada zona antara quartil atas ( $Q_3$ ) dan nilai dosis maksimum tertinggi ( $X_T$ ). Besarnya NPD pekerja radiasi yang diperoleh dengan metode ini merupakan upaya optimisasi proteksi dan keselamatan radiasi yang bersifat antisipatif. Sedangkan penentuan NPD pekerja radiasi dengan metode relativitas median didasarkan pada nilai R dan nilai  $X_T$  pada zona antara quartil tengah/median ( $Q_2$ ) dan nilai dosis maksimum tertinggi ( $X_T$ ). Besarnya NPD pekerja radiasi yang diperoleh dengan metode ini merupakan upaya optimisasi proteksi dan keselamatan radiasi yang bersifat protektif.

Pada makalah ini akan dikaji beberapa karakteristik NPD pekerja radiasi pada zona quartil atas yang ditentukan dengan menggunakan metode quartilisasi dosis maksimum. Dengan mengetahui beberapa karakteristik NPD pekerja radiasi ini diharapkan PI dapat memahami secara lebih mendalam tentang argumentasi matematis yang digunakan dalam menentukan NPD pekerja radiasi tersebut.

## METODOLOGI

Untuk mengetahui beberapa karakteristik NPD pekerja radiasi yang diperoleh dengan metode quartilisasi dosis maksimum dapat dilakukan dengan menggunakan metode sebagai berikut [3-6]:

1. Pengurutan datum dosis maksimum mulai dari yang terendah hingga yang tertinggi.
2. Penentuan nilai quartil bawah ( $Q_1$ ), quartil tengah/median ( $Q_2$ ) dan quartil atas ( $Q_3$ ).
3. Penentuan nilai rata-rata dosis maksimum dan simpangan baku pada zona antara  $Q_3$  dan datum dosis maksimum tertinggi.
4. Penentuan NPD diperoleh dari nilai rata-rata datum dosis maksimum  $\pm$  nilai simpangan baku.
5. Pembuatan kajian karakteristik NPD pada zona quartil atas.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Urutan Datum Dosis Maksimum

Untuk memahami karakteristik NPD pekerja radiasi, sebagai contoh, sebuah institusi yang melakukan kegiatan pemanfaatan tenaga nuklir memiliki 5 bidang kegiatan (A, B, C, D dan E), dengan hasil penerimaan dosis maksimum masing-masing bidang selama periode 5 tahun terakhir secara lengkap diberikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Dosis Maksimum Tiap Bidang

No	Bidang	Dosis Maksimum (mSv)				
		2013	2014	2015	2016	2017
01.	A	3,20	2,78	2,85	2,75	3,25
02.	B	3,85	5,75	1,45	2,80	7,55
03.	C	2,85	1,30	2,65	7,56	9,35
04.	D	2,90	4,80	4,15	2,85	8,48
05.	E	9,23	8,79	5,89	6,73	4,89

Untuk keperluan penentuan NPD pekerja radiasi dengan metode quartilisasi dosis maksimum dan untuk mengetahui karakteristik NPD tersebut, terlebih dahulu dibuat urutan datum dosis maksimum dari yang terendah hingga yang tertinggi sebagaimana diberikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Datum Dosis Maksimum Terurut

No.	Datum Dosis	No.	Datum Dosis	No.	Datum Dosis
01.	1,30	10.	2,90	19.	6,73
02.	1,45	11.	3,20	20.	7,55
03.	2,65	12.	3,25	21.	7,56
04.	2,75	13.	3,85	22.	8,48
05.	2,78	14.	4,15	23.	8,79
06.	2,80	15.	4,80	24.	9,23

07.	2,85	16.	4,89	25.	9,35
08.	2,85	17.	5,75		
09.	2,85	18.	5,89		

### Quartilisasi Nilai Dosis Maksimum

Quartilisasi datum dosis maksimum dibuat dengan tujuan untuk mengetahui pembagian zona quartil yakni ke dalam zona quartil bawah, zona quartil tengah dan zona quartil atas.

Dengan menggunakan prinsip quartilisasi nilai datum dosis maksimum, maka dari Tabel 2 di atas akan diperoleh nilai quartil dosis sebagai berikut :

1. Quartil bawah ( $Q_1$ ) :  
Terletak pada datum dosis maksimum yang ke 6 dan 7.  
 $Q_1 = \frac{1}{2} (2,80+2,85) = 2,825$  mSv.
2. Quartil tengah ( $Q_2$ ) = Median :  
Terletak pada datum dosis maksimum yang ke 13.  
 $Q_2 = 3,85$  mSv.
3. Quartil atas ( $Q_3$ ) :  
Terletak pada datum dosis maksimum yang ke 19 dan 20.  
 $Q_3 = \frac{1}{2} (6,73+ 7,55) = 7,14$  mSv.

### Penentuan NPD Dengan Metode Quartilisasi Dosis Maksimum

Untuk penentuan NPD pekerja radiasi dengan metode quartilisasi dosis maksimum, antara  $Q_3$  dan datum dosis maksimum terbesar diurutkan datum dosisnya sebagaimana diberikan pada Tabel 3 kemudian dicari nilai rata-rata dan simpangan bakunya (SB).

Tabel 3. Urutan Datum Dosis Maksimum Untuk Penentuan NPD

Urutan datum dosis maksimum pada zona di atas $Q_3$					
7,14	7,56	8,48	8,79	9,23	9,35
$Q_3$					Dosis terbesar
Rataan dodis (R) : 8,425 mSv					

Dengan menggunakan nilai rataan dosis ini selanjutnya ditentukan nilai simpangan baku dosis sebagai berikut :

Tabel 4. Penentuan Nilai Simpangan Baku Dosis

No.	Dosis (X)	Rata-Rata (R)	( X-R) <sup>2</sup>
01.	7,14	8,425	1,6512
02.	7,56	8,425	0,7482
03.	8,48	8,425	0,0030
No.	Dosis (X)	Rata-Rata (R)	( X-R) <sup>2</sup>
04.	8,79	8,425	0,1332
05.	9,23	8,425	0,6480
06.	9,35	8,425	0,8556
$\sum ( X - R)^2$			4,0392
$[\sum ( X - R)^2 ]/n$			0,6732

Dengan menggunakan perumusan :

$$\text{Simpangan baku (SB)} = \sigma = \sqrt{\frac{\sum |x - R|^2}{n}}$$

maka nilai simpangan baku dosisnya adalah :

$$SB = \sigma = 0,8205 \text{ mSv.}$$

Dari sini dapat ditentukan besarnya NPD, yaitu :

NPD = (8,425±0,8205) mSv dengan NPD terbesar yaitu 9,2455 mSv ( dibulatkan ke atas menjadi 9 mSv) dan NPD terkecil 7,6045 mSv ( dibulatkan ke bawah menjadi 7 mSv). Besaran NPD = 9 mSv dinamakan batas atas dan NPD = 7 mSv dinamakan batas bawah.

### Bentuk Dasar Formulasi Matematis NPD

Berdasarkan hasil penentuan NPD pekerja radiasi yang diperoleh dengan menggunakan metode quartilisasi dosis maksimum terlihat bahwa NPD merupakan fungsi linier yang secara matematis dapat diformulasikan sebagai :

$$\text{NPD} = (8,425 \pm 0,8205)$$

$$\text{NPD} = R \pm \sigma \quad \dots (1)$$

Dengan R menyatakan rata-rata datum dosis maksimum dan  $\sigma$  simpangan baku datum dosis maksimum pada zona antara  $Q_3$  dan datum dosis maksimum tertinggi.

### Karakteristik Nilai Pembatas Dosis

#### Linier Kontinu Terhadap Perubahan Simpangan Baku

Mengingat penentuan besarnya NPD untuk pekerja radiasi dengan metode quartilisasi dosis maksimum bertumpu pada nilai rata-rata datum dosis maksimum pada zona antara  $Q_3$  dan  $X_T$ , dari persamaan (1) terlihat bahwa karakteristik dasar dari NPD pekerja radiasi adalah linier kontinu terhadap perubahan simpangan baku yang secara matematis ditunjukkan dengan adanya tanda  $\pm$  di depan notasi simpangan baku  $\sigma$ . Ini mengandung pengertian bahwa jika diambil bentuk  $(R+\sigma)$  akan diperoleh NPD pekerja radiasi pada batas atas dan jika diambil bentuk  $(R-\sigma)$  akan diperoleh NPD pekerja radiasi pada batas bawah.

Jika banyaknya datum dosis maksimum yang tersebar antara  $Q_3$  dan  $X_T$  relatif cukup banyak, maka nilai simpangan baku datum dosisnya akan kecil, sehingga pengaruhnya terhadap NPD pekerja radiasi juga kecil. Begitupun sebaliknya jika banyaknya datum dosis maksimum yang tersebar sedikit maka nilai simpangan baku datum dosisnya akan besar sehingga pengaruhnya terhadap NPD pekerja radiasi juga besar.

### Hubungan NPD Dengan Simpangan Baku Dosis Dan Sebaran Normal Dosis

Pada zona antara  $Q_3$  dan  $X_T$ , karakteristik sebaran normal datum dosis maksimum sangat mempengaruhi besarnya NPD. Dengan mengacu pada konsep "Distribusi Gauss", fungsi sebaran normal dosis personal secara matematis dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-R)^2}{2\sigma^2}} \dots (2)$$

dengan :

x = datum dosis maksimum pada zona kuartil atas

R = rata-rata dosis maksimum pada zona kuartil atas.

$\sigma$  = simpangan baku datum dosis maksimum.

Mengingat penentuan NPD pekerja radiasi dengan menggunakan metode quartilisasi dosis maksimum bertumpu pada nilai R, maka pada persamaan (2) jika nilai X diganti dengan  $X_T$ , akan diperoleh formulasi matematis terkait dengan R yaitu :

$$R = X_T - \sigma \sqrt{\ln\left(\frac{1}{2\pi\sigma^2 P}\right)} \dots\dots (3)$$

Dengan menggunakan persamaan (3) ini, maka persamaan (1) akan menjadi :

$$NPD = R \pm \sigma = [ X_T - \sigma \sqrt{\ln\left(\frac{1}{2\pi\sigma^2 P}\right)} ] \pm \sigma$$

$$NPD = X_T \pm [ 1 - \sqrt{\ln\left(\frac{1}{2\pi\sigma^2 P}\right)} ] \sigma \dots\dots (4)$$

Pada persamaan (3) terlihat bahwa rata-rata dosis maksimum merupakan fungsi dari simpangan baku dosis maksimum dan sebaran normal dosis.

Jika persamaan (3) dicermati secara lebih mendalam akan diperoleh :

1. Besarnya R akan maksimum dengan nilai  $(X_T + \sigma)$  mSv jika nilai dari bentuk  $\sqrt{\ln\left(\frac{1}{2\pi\sigma^2 P}\right)}$  sama dengan -1.
2. Besarnya R akan minimum dengan nilai  $(X_T - \sigma)$  mSv jika nilai dari bentuk  $\sqrt{\ln\left(\frac{1}{2\pi\sigma^2 P}\right)}$  sama dengan +1.

Dari persamaan (4) terlihat secara matematis menunjukkan hubungan antara NPD pekerja radiasi dengan simpangan baku dosis dan sebaran normal dosis (P) pada zona quartil atas.

**Linier Logaritmik Naturalis Terhadap Perubahan Sebaran Normal Dosis Personil**

Persamaan (4) secara matematis menunjukkan karakteristik dari NPD pekerja radiasi yakni linier logaritmik naturalis terhadap perubahan sebaran normal dosis personil (P) pada zona quartil atas.

Jika persamaan (4) dicermati secara lebih mendalam akan diperoleh :

1. Besarnya NPD akan maksimum dengan nilai  $(X_T \pm 2\sigma)$  mSv jika nilai dari bentuk  $\sqrt{\ln\left(\frac{1}{2\pi\sigma^2 P}\right)}$  sama dengan -1.

Bentuk  $\sqrt{\ln\left(\frac{1}{2\pi\sigma^2 P}\right)} = -1$  jika diselesaikan akan diperoleh nilai P :

$$P \geq \sqrt{\frac{1}{2\pi\sigma}}$$

Jika digunakan nilai  $\sigma = 0,8205$  mSv, maka akan diperoleh nilai  $P \geq 0,4405$  mSv. Dari sini terlihat bahwa zona nilai maksimum dari NPD dimulai pada saat  $P = 0,4405$  mSv.

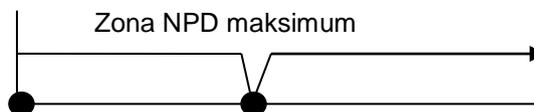
2. Besarnya NPD akan minimum dengan nilai  $X_T$  mSv jika nilai dari bentuk  $\sqrt{\ln\left(\frac{1}{2\pi\sigma^2 P}\right)}$  sama dengan +1.

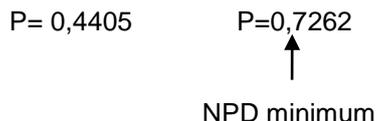
Bentuk  $\sqrt{\ln\left(\frac{1}{2\pi\sigma^2 P}\right)} = +1$  jika diselesaikan akan diperoleh nilai P :

$$P = \sqrt{\frac{2,7172}{2\pi\sigma}}$$

Jika digunakan nilai  $\sigma = 0,8205$  mSv, maka akan diperoleh nilai  $P = 0,7262$  mSv. Dari sini terlihat bahwa nilai minimum dari NPD terjadi pada saat  $P = 0,7262$  mSv.

Kondisi tersebut di atas secara jelas diberikan pada Gambar 1.





Gambar 1. Kondisi Maksimum dan Minimum NPD Pekerja Radiasi

Dari kedua hasil tersebut di atas, terlihat dengan jelas bahwa sebaran normal dosis personil merupakan fungsi dari simpangan baku datum dosis maksimum ( $\sigma$ ). Hal ini sesuai dengan karakteristik dasar dari sebaran normal dosis personil sebagaimana dinyatakan dalam persamaan (2).

Karakteristik linier logaritmik naturalis dari NPD pekerja radiasi secara matematis ditunjukkan oleh bentuk  $[ 1 - \sqrt{\ln(\frac{1}{2\pi\sigma P^2})} ]$  dimana jika dikaji secara lebih mendalam ini sebenarnya merupakan konstanta dari sebuah fungsi liner NPD pekerja radiasi.

Untuk memahami karakteristik linier logaritmik naturalis dari NPD pekerja radiasi berikut ini akan diberikan contoh. Dengan menggunakan nilai datum dosis maksimum tertinggi  $X_T = 9,35$  mSv, nilai  $P = 1,937 \cdot 10^{-1}$  mSv (tertinggi) dan  $\sigma = 0,8205$  mSv, serta persamaan (4), akan diperoleh  $NPD = 9,119$  mSv = 9 mSv (dibulatkan ke atas).

Sedangkan jika menggunakan nilai datum dosis maksimum tertinggi  $X_T = 9,35$  mSv, nilai  $P = 5,694 \cdot 10^{-2}$  (terendah) dan  $\sigma = 0,8205$  mSv, serta persamaan (4), akan diperoleh  $NPD = 6,8113$  mSv = 7 mSv (dibulatkan ke atas).

Dari hasil tersebut di atas terlihat bagaimana karakteristik NPD pekerja radiasi terkait dengan perubahan nilai sebaran normal dosis personil pada zona quartil atas. Pada saat diambil nilai  $P$  yang tertinggi ( $1,937 \cdot 10^{-1}$  mSv), akan diperoleh NPD yang terletak pada batas atas ( 9 mSv). Sedangkan pada saat diambil nilai  $P$  terendah ( $5,694 \cdot 10^{-2}$  mSv), akan diperoleh NPD yang terletak pada batas bawah (7 mSv). Ringkasannya secara lengkap diberikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Pengaruh Perubahan Sebaran Normal Dosis Terhadap NPD

Sebaran Normal Dosis	Nilai Pembatas Dosis
Tertinggi	Batas bawah
Terendah	Batas atas

## KESIMPULAN

Berdasarkan uraian tersebut di atas dan dari contoh yang diberikan, dapat ditarik kesimpulan bahwa besarnya NPD pekerja radiasi yang ditentukan dengan metode quartilisasi dosis maksimum memiliki karakteristik linier kontinyu terhadap perubahan simpangan baku serta linier logaritmik naturalis terhadap perubahan sebaran normal datum dosis maksimum.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Sekretariat Negara, Peraturan Pemerintah No. 33 Tahun 2007 Tentang Keselamatan Radiasi Pengion Dan Keamanan Sumber Radioaktif, Jakarta, 2007.
2. Badan Pengawas Tenaga Nuklir , Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 4 Tahun 2013 tentang Proteksi Dan Keselamatan Radiasi Dalam Pemanfaatan Tenaga Nuklir , Jakarta, 2013.
3. Muhammad, Suhaedi, Gagasan Penentuan Nilai Pembatas Dosis Untuk Instalasi Produksi Radioisotop Dan Radiofarmaka, Disampaikan Pada Seminar Nasional Teknologi Dan Aplikasi Reaktor Nuklir ( PRSG-BATAN ), 3 Oktober 2012, Serpong, 2012.
4. Muhammad, Suhaedi , Kaji Ulang Pembatas Dosis Berdasarkan Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013, Disampaikan Pada Seminar Nasional Teknologi Dan Aplikasi Reaktor Nuklir, PRSG-BATAN, Serpong, 24 September 2014.
5. Muhammad, Suhaedi, Penerapan nilai pembatas dosis sebagai upaya perlindungan terhadap keselamatan pekerja radiasi, Disampaikan Pada Seminar Nasional

Keselamatan, Kesehatan Lingkungan dan Pengembangan Teknologi Nuklir – PTKMR-BATAN, Jakarta, 25 Agustus 2015.

6. Muhammad, Suhaedi, Komparasi Penentuan Nilai Pembatas Dosis Antara Metode Quartilisasi Dosis Maksimum dengan Metode Distribusi Frekuensi Pada Zona Quartil Atas, Jakarta, 2018.
7. Numidas O Linjap, Applying Mathematics, Phoenix Publishing House, Inc, 1998.
8. Muhammad, Suhaedi, Sinopsis Matematika Untuk SMU, Bimbingan dan Konsultasi Belajar Nurul Fikri, Jakarta, 1996.
9. Harum, Anita Sugiarti. 2013. *Distribusi Normal (Kurva Normal)*. Diunduh dari: <https://anitaharum.wordpress.com/2013/11/12/distribusi-normal-kurva-normal/>. Pada hari Jum'at pukul 14:00 WIB.

#### **DISKUSI/TANYA JAWAB**

##### **1. PERTANYAAN :**

Bagaimana kalau perubahan NPD tidak bersifat linier?

##### **JAWABAN :**

Mengingat bentuk formulasi dasar dari Nilai Pembatas Dosis (NPD) bersifat linier:  $NPD = R + \sigma$  ( $R$ =datum Dosis,  $\sigma$ = simpangan baku) maka perubahan NPD akan bersifat linier.

Halaman ini sengaja di kosongkan

## **IDENTIFIKASI BAHAN BERBAHAYA DAN BERACUN DALAM EVALUASI TAPAK INSTALASI NUKLIR**

**Dedi Hermawan dan Nur Siwhan**

*Pusat Pengkajian Sistem dan Teknologi Pengawasan Instalasi dan Bahan Nuklir – BAPETEN*

*Jl. Gajah Mada No. 8 Jakarta Pusat 10120*

*email: d.hermawan@bapeten.go.id*

### **ABSTRAK**

**IDENTIFIKASI BAHAN BERBAHAYA DAN BERACUN DALAM EVALUASI TAPAK INSTALASI NUKLIR.** Salah satu aspek yang perlu dievaluasi dalam tapak instalasi nuklir adalah lepasan bahan kimia berbahaya dan beracun. Perka BAPETEN No. 6 Tahun 2008 sudah menjelaskan tahapan evaluasi yang perlu dilakukan oleh pemohon evaluasi tapak (PET) dalam melakukan evaluasi aspek ulah manusia, termasuk lepasan bahan kimia berbahaya dan beracun. Perka tersebut tidak menjelaskan jenis bahan-bahan kimia berbahaya dan beracun apa saja yang perlu dievaluasi oleh PET yang kemungkinan terdapat di suatu industri kimia sehingga menyulitkan bagi pemohon izin dalam melakukan identifikasi dan juga menyulitkan evaluator dalam mengevaluasi. Metoda yang digunakan dalam makalah ini adalah dengan cara studi literatur. Berdasarkan tinjauan ini dapat disimpulkan bahwa terdapat beberapa dokumen yang dapat digunakan sebagai penunjang Perka BAPETEN No. 6 Tahun 2008 dalam mengidentifikasi bahan berbahaya dan beracun di industri kimia yaitu diantaranya Keputusan Menteri Tenaga Kerja R.I No. KEP. 187/MEN/1999 tentang Pengendalian Bahan Kimia Berbahaya di Tempat Kerja, Peraturan Pemerintah No. 74 tahun 2001 Tentang Pengelolaan Bahan Berbahaya dan Beracun, *Regulatory Guide 1.78 rev. 1 Tentang Evaluating The Habitability Of A Nuclear Power Plant Control Room During A Postulated Hazardous Chemical Release* dan NUREG/CR-6624 tentang *Recommendations for Revision of Regulatory Guide 1.78*.

Kata kunci: bahan berbahaya dan beracun, tapak, instalasi nuklir

### **ABSTRACT**

**IDENTIFICATION OF HAZARDOUS AND TOXIC MATERIALS IN EVALUATION OF NUCLEAR INSTALLATION SITE.** One aspect that needs to be evaluated in the nuclear installation site is the release of hazardous and toxic chemicals. BAPETEN Chairman Regulation No. 6 Year 2008 has explained the evaluation stage that need to be done by applicant in order to evaluating aspects of human induced events, including release of hazardous and toxic chemicals. This BCR doesn't cover the various of hazardous and toxic chemicals that need to be evaluated by applicants which may be present in a chemical industry that cause difficulties for applicants to identify and also cause difficulties for evaluators to evaluate. This reasearch will be based on literature study method. Based on this review, it can be concluded that there are several documents that can be used as a support for BCR in order to identifying hazardous and toxic materials in the chemical industry such as Indonesian labour ministrial decree No. 187/MEN/1999 about controlled of hazardous chemical substance on workplace, Government regulation No. 74 year 2001 about control for Hazardous dan toxic substance, *Regulatory Guide 1.78 rev. 1 about Evaluating The Habitability Of A Nuclear Power Plant Control Room During A Postulated Hazardous Chemical Release* and NUREG/CR-6624 about *Recommendations for Revision of Regulatory Guide 1.78*.

Keyword: hazardous and toxic materials, site, nuclear installation

### **PENDAHULUAN**

Tujuan utama evaluasi tapak instalasi nuklir dalam hal keselamatan nuklir adalah untuk melindungi pekerja, masyarakat dan lingkungan dari konsekuensi radiologi pelepasan material radioaktif akibat kondisi operasi normal dan kondisi kecelakaan.

Secara umum, terdapat beberapa aspek yang perlu dipertimbangkan dalam melakukan evaluasi kesesuaian tapak untuk instalasi nuklir yaitu :

- Aspek kejadian eksternal di wilayah tapak (kejadian eksternal dapat berasal dari alam atau akibat ulah manusia)
- Karakteristik tapak dan lingkungan sekitar yang dapat berpengaruh pada perpindahan material radioaktif yang dilepaskan
- Densitas dan distribusi populasi penduduk

Fasilitas dan aktivitas manusia di wilayah tapak suatu instalasi nuklir dapat berpengaruh bagi keselamatan pengoperasian instalasi nuklir. Oleh sebab itu, sumber-sumber potensi kejadian eksternal akibat ulah manusia (KAUM) terhadap instalasi nuklir harus diidentifikasi serta tingkat keparahan yang mungkin terjadi hendaknya dievaluasi untuk memperoleh dasar desain instalasi nuklir yang tepat. Identifikasi dan evaluasi ini harus dipantau dan dikaji secara berkala selama umur pakai instalasi untuk memastikan kesesuaiannya dengan asumsi desain instalasi.

Berdasarkan Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 6 Tahun 2008 Tentang Evaluasi Tapak Reaktor Daya Untuk Aspek Kejadian Eksternal Akibat Ulah Manusia [1], disebutkan pada pasal 2 bahwa aspek kejadian eksternal akibat ulah manusia meliputi :

- a. jatuhnya pesawat terbang;
- b. lepasan fluida berbahaya dan beracun;
- c. ledakan;
- d. kejadian eksternal lainnya yang diakibatkan ulah manusia; dan
- e. bahan berbahaya dan beracun dari fasilitas lain yang terletak pada tapak yang sama yang ditangani selama tahap konstruksi, operasi, dan dekomisioning.

Seluruh aspek kejadian eksternal akibat ulah manusia tersebut harus dievaluasi untuk melihat pengaruhnya terhadap calon instalasi nuklir. Sesuai dengan pasal 2 diatas, salah satu aspek yang perlu dianalisis dalam kejadian akibat ulah manusia adalah terkait dengan lepasan fluida berbahaya dan beracun. Salah satu tahapan dalam proses analisis adalah identifikasi sumber bahaya yang dalam hal ini adalah menentukan apakah suatu jenis dan jumlah bahan kimia perlu dipertimbangkan dalam analisis selanjutnya.

Apabila tidak terdapat identifikasi yang jelas terkait dengan bahan berbahaya dan beracun, maka akan terdapat beberapa kesulitan seperti :

- Pemohon izin akan kesulitan dalam melakukan proses identifikasi
  - Tanpa adanya acuan atau contoh yang jelas, maka pemohon izin akan kesulitan dalam menentukan apakah suatu sumber memang layak untuk diidentifikasi dan dimasukkan pada tahapan berikutnya
  - Kurangnya efisiensi pemohon izin karena harus mengidentifikasi seluruh sumber yang ada
  - Terdapat potensi tidak teridentifikasinya sumber-sumber yang sebenarnya memiliki potensi bahaya yang besar bagi instalasi nuklir
- Evaluator akan kesulitan dalam menentukan apakah suatu sumber yang ada memang merupakan sumber yang berbahaya dan perlu dievaluasi oleh pemohon izin

Dalam Perka No. 6 Tahun 2008 tersebut sudah dijelaskan tahapan evaluasi yang perlu dilakukan oleh PET dalam melakukan evaluasi aspek KAUM secara rinci, akan tetapi di dalam Perka tersebut tidak dijelaskan/disebutkan jenis bahan-bahan kimia berbahaya dan beracun apa saja yang perlu dievaluasi oleh PET yang kemungkinan terdapat di suatu industri kimia. Oleh sebab itu, proses identifikasi merupakan salah satu tahapan awal yang penting dalam melakukan evaluasi terhadap kejadian akibat ulah manusia adalah terkait dengan lepasan fluida berbahaya dan beracun.

Pada makalah ini akan dipaparkan identifikasi bahan berbahaya dan beracun yang dapat digunakan dalam proses evaluasi tapak khususnya aspek lepasan fluida berbahaya dan beracun.

## **POKOK BAHASAN**

Pokok permasalahan yang akan dikaji dalam makalah ini adalah :

- Identifikasi jenis dan jumlah bahan berbahaya dan beracun dalam evaluasi tapak instalasi nuklir aspek kejadian akibat ulah manusia.
- Kajian ini tidak mencakup identifikasi gas dan cairan bersifat korosif dan radioaktif

## **METODOLOGI**

Dalam kajian ini, metodologi yang digunakan adalah dengan metode studi literatur terhadap beberapa dokumen terkait.

## **HASIL DAN PEMBAHASAN**

### **Lepasan Fluida Berbahaya dan Beracun**

Salah satu aspek yang perlu dianalisis dalam kejadian akibat ulah manusia adalah terkait dengan lepasan fluida berbahaya dan beracun.

Fluida berbahaya dan beracun tersebut terdiri dari :

- a. Gas dan uap mudah terbakar yang dapat membentuk awan ledakan dan dapat memasuki saluran sistem ventilasi, kemudian terbakar atau meledak;  
Pada kategori ini, yang perlu diperhatikan adalah bahan yang dapat menjadi gas atau uap dan kemudian bergerak mendekati reaktor atau instalasi nuklir dan menimbulkan ledakan sehingga mempengaruhi keselamatan reaktor dan instalasi nuklir. Potensi bahaya awan ledakan tersebut terdiri dari dua jenis yaitu :
  - ketika awan berada di luar reaktor, maka awan tersebut dapat memberikan potensi bahaya yang mirip dengan beberapa bahaya eksternal lainnya akibat ulah manusia seperti kebakaran, ledakan, dan efeknya yang terkait.
  - Awan tersebut juga dapat menyebar masuk ke gedung reaktor dan mengakibatkan bahaya bagi personil dan item penting terhadap keselamatan, khususnya untuk awan yang berasal dari gas beracun, gas asfiksia, atau gas eksplosif. Awan ini juga mempengaruhi kemampuan layak huni ruang kendali dan area penting lainnya dari reaktor daya.
- b. gas beracun dan gas asfiksia yang dapat mengancam kehidupan manusia dan merusak fungsi kesehatan yang penting;  
Lepasan bahan beracun dan asfiksia ini berpotensi memberikan berbagai potensi bahaya seperti :
  - Ancaman terhadap kehidupan dan kesehatan manusia dan menurunnya tingkat layak-huni area yang terkait keselamatan.
  - Hambatan terhadap terpenuhinya fungsi keselamatan oleh operator
- c. gas dan cairan bersifat korosif dan radioaktif yang dapat mengancam kehidupan manusia dan merusak fungsi peralatan.

Sumber-sumber dari fluida berbahaya dan beracun tersebut dapat berupa sumber bergerak ataupun tetap seperti tangki penyimpanan, jalur pipa, perlengkapan pemadam kebakaran, truk tangki, jalur jalan raya dan juga kapal tongkang.

### **Identifikasi Bahan Berbahaya dan Beracun Berdasarkan Perka BAPETEN No. 6 Tahun 2008**

Pada Perka 6 tahun 2008, tidak terdapat uraian yang cukup rinci terkait dengan jenis-jenis bahan atau sumber yang perlu diidentifikasi dan dievaluasi oleh pemohon izin.

Pada bagian lampiran disebutkan bahwa semua instalasi pada tahap konstruksi, operasi, dan/atau dekomisioning yang menangani, memproses, atau menyimpan bahan berbahaya dan beracun harus diidentifikasi sebagai sumber bahaya antara lain:

- a. bahan eksplosif;
- b. bahan mudah terbakar;
- c. bahan korosif;
- d. bahan beracun, atau zat radioaktif;

Namun demikian, uraian ini tidak memberikan informasi yang jelas tentang contoh bahan yang termasuk dalam bahan berbahaya dan beracun yang perlu diidentifikasi sebagai sumber bahaya.

Hal ini akan berpotensi memberikan kesulitan dalam proses identifikasi sumber bahaya yang dilakukan.

**Identifikasi bahan kimia berbahaya berdasarkan Keputusan Menteri Tenaga Kerja R.I No. KEP. 187/MEN/1999 tentang Pengendalian Bahan Kimia Berbahaya di Tempat Kerja**

Berdasarkan pada Kepmen 187/MEN/1999, disebutkan bahwa kategori potensi bahaya perusahaan atau industri akan ditentukan berdasarkan pada Nama, Kriteria dan Nilai Ambang Batas (NAK) bahan kimia berbahaya yang terdapat di lokasi perusahaan atau industri tersebut [2]. Kriteria dari bahan kimia berbahaya tersebut terdiri dari :

- a. bahan beracun
- b. bahan sangat beracun
- c. cairan mudah terbakar
- d. cairan sangat mudah terbakar
- e. gas mudah terbakar
- f. bahan mudah meledak
- g. bahan reaktif
- h. bahan oksidator

Kriteria penetapan bahan kimia berbahaya yang beracun dan sangat beracun akan tergantung pada sifat kimia, fisika dan toksik dari bahan tersebut atau seringkali disebut dengan parameter *Lethal Dose 50* (dosis yang menyebabkan kematian pada 50 % binatang percobaan) dan *Lethal Concentration 50* (konsentrasi yang menyebabkan kematian pada 50 % binatang percobaan) Semakin kecil nilai *Lethal Dose* (LD50) dan *Lethal Concentration 50* (LC50), maka bahan kimia tersebut memiliki tingkat racun yang semakin tinggi.

Contoh kriteria bahan beracun dan sangat beracun berdasarkan LD 50 dan LC 50 adalah sebagai berikut :

- a. bahan beracun dalam hal pemajaman melalui Mulut : LD50 > 25 atau < 200 mg/kg berat badan, atau kulit : LD 50 > 25 atau 400 mg/kg berat badan, atau Pernafasan : LC 50 > 0.5 mg/l dan 2 mg/l
- b. bahan sangat beracun dalam hal pemajaman melalui Mulut : LD 50 ≤ 25 mg/kg berat badan, atau kulit : LD 50 ≤ 25 mg/kg berat badan, atau pernafasan LC 50 ≤ 0.5 mg/l.

Keputusan menteri ini juga menetapkan bahan kimia berbahaya berdasarkan nilai ambang kuantitas (NAK), dimana jika kuantitas bahan kimia tersebut melebihi NAK maka bahan kimia tersebut digolongkan menjadi potensi bahaya besar, sedangkan jika kuantitas dibawah NAK maka digolongkan menjadi potensi bahaya menengah. Contoh NAK dari bahan beracun dan sangat beracun dapat dilihat di tabel 1 dan tabel 2 berikut, sedangkan untuk rincian lengkapnya dapat mengacu ke lampiran Keputusan Menteri.

Tabel 1. Contoh NAK Bahan Beracun

No	Nama Barang	NAK (ton)	No	Nama Barang	NAK (ton)
1	Aceton Cyanohydrin (s-Cyanopropan-2-1)	200	6	Hydrogen Chloride (Liquefied gas)	250
2	Acrolein (2-propenal)	200	7	Hydrogen cyanide	20
3	Acrylonitrile	20	8	Hydrogen fluoride	0
4	Allyl alcohol (2-propen-1-1)	200	9	Hydrogen sulphide	50
5	Allyamine	200	10	Methyl bromide (Bromomethane)	200

Tabel 2. Contoh NAK Bahan sangat beracun

No	Nama Barang	NAK (ton)	No	Nama Barang	NAK (ton)
1	Aldicarb	0.1	6	4-Flurocrotonic acid, esters	0.1
2	4-Aminodiphenyl	0.001	7	4-Flurocrotonic acid, amides	0.001
3	Amiton	0.001	8	4-Floro-2-hydroxybutyric acid	0.001
4	Anabasine	0.1	9	4-Floro-2-hydroxybutyric acid, salts	0.1
5	Arsenic pentoxide, arsenic (V) acid and salts	0.5	10	4-Floro-2-hydroxybutyric acid, ester	0.5

Tabel tersebut dapat digunakan untuk mengidentifikasi potensi bahaya industri yang kemudian dapat digunakan untuk menganalisis tingkat bahaya ke instalasi nuklir.

### Identifikasi Bahan Berbahaya dan Beracun Berdasarkan PP 74 tahun 2001 Tentang Pengelolaan Bahan Berbahaya dan Beracun

Pemerintah Indonesia telah mengeluarkan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 74 Tahun 2001 Tentang Pengelolaan Bahan Berbahaya dan Beracun yang bertujuan mengatur pengelolaan B3 untuk mencegah dan atau mengurangi risiko dampak B3 terhadap lingkungan hidup, kesehatan manusia dan makhluk hidup lainnya.

Pada pasal 5 ayat 1 peraturan tersebut, disebutkan bahwa bahan berbahaya dan beracun dapat diklasifikasikan sebagai berikut [3]:

- a. mudah meledak (*explosive*);
- b. pengoksidasi (*oxidizing*);
- c. sangat mudah sekali menyala (*extremely flammable*);
- d. sangat mudah menyala (*highly flammable*);
- e. mudah menyala (*flammable*);
- f. amat sangat beracun (*extremely toxic*);
- g. sangat beracun (*highly toxic*);
- h. beracun (*moderately toxic*);
- i. berbahaya (*harmful*);
- j. korosif (*corrosive*);
- k. bersifat iritasi (*irritant*);
- l. berbahaya bagi lingkungan (*dangerous to the environment*);
- m. karsinogenik (*carcinogenic*);
- n. teratogenik (*teratogenic*);
- o. mutagenik (*mutagenic*).

Pada bagian penjelasan peraturan tersebut juga disampaikan identifikasi klasifikasi yang menjelaskan lebih rinci kriteria bahan berbahaya dan beracun yang terdapat pada pasal 5 (1) tersebut. Dengan demikian, terdapat kriteria-kriteria tertentu untuk menentukan apakah suatu bahan kimia tercakup pada kategori bahan B3.

Salah satu hal yang dapat digunakan dalam PP 74 tahun 2001 ini adalah terdapat rincian B3 yang mempermudah identifikasi apakah suatu bahan termasuk B3 atautakah tidak. Rincian tersebut dapat diringkas sebagai berikut :

1. Bahan Berbahaya dan Beracun (B3) yang dipergunakan sejumlah 209 bahan kimia
2. Bahan Berbahaya dan Beracun (B3) yang dilarang dipergunakan sejumlah 10 bahan kimia
3. Bahan Berbahaya dan Beracun (B3) yang terbatas dipergunakan sejumlah 45 bahan kimia

Contoh dari bahan berbahaya dan beracun tersebut dapat dilihat pada tabel 3, sedangkan rincian lengkap dapat dilihat pada lampiran PP 74 tahun 2001.

Tabel 3. Contoh bahan Berbahaya dan Beracun berdasarkan PP 74 tahun 2001

No.	No. Reg. Chemical1 Abstract Service	Nama Bahan Kimia	Sinonim/ Dagang	Nama Rumus Molekul
1	540-59-0	1,2- dikloroetilena	Acetylene dichloride; 1,2- dichloroethylene; 1,2- dichloroethene; 1,2- dichloroethylene; symdichloroethylene; Dioform.	C2H2Cl2
2	79-06-1	Akrilamida	Acrylamide; 2- propenamide	C3H5NO
3	107-13-1	Akronitril	Acrylonitrile; propenitrile; Vinyl cyanide; Cyanoethylene; Acritet; Fumigrain; Ventox	2- C3H3N

dan lain-lain (daftar lengkap terdapat pada PP 74 tahun 2001)

Daftar bahan kimia berbahaya dan beracun yang terdapat dalam peraturan tersebut dapat digunakan sebagai alat penapis awal apakah suatu bahan kimia yang terdapat dalam instalasi kimia, jalur pipa, tangki ataupun penyimpanan lainnya tercakup dalam kategori bahan berbahaya dan beracun. Dengan menggunakan daftar tersebut, maka akan mengurangi potensi lolosnya suatu bahan kimia berbahaya dan beracun dari proses penapisan. Selain itu daftar tersebut akan mempermudah proses identifikasi yang dilakukan oleh pemohon izin ataupun proses evaluasi yang dilakukan oleh BAPETEN.

Meskipun demikian, PP 74 tahun 2001 ini hanya menampilkan contoh bahan yang termasuk B3 secara umum, sedangkan ukuran kuantitas (NAK) suatu B3 dapat menggunakan Kepmen No. KEP. 187/MEN/1999.

### **Identifikasi Bahan Berbahaya dan Beracun Berdasarkan Regulatory Guide 1.78 revision 1 Tentang *Evaluating The Habitability Of A Nuclear Power Plant Control Room During A Postulated Hazardous Chemical Release***

Ruang kendali reaktor nuklir atau instalasi nuklir sebaiknya dilindungi dari berbagai bahan berbahaya dan beracun yang dapat diakibatkan oleh kegagalan peralatan, kesalahan manusia atau kejadian dan kondisi diluar instalasi nuklir tersebut.

Pelepasan bahan berbahaya dan beracun tersebut dapat menyebabkan ruang kendali menjadi tak dapat ditempati dan akhirnya akan menyebabkan operator tak dapat melakukan fungsi keselamatan seperti yang diharuskan [4].

Oleh sebab itu, US NRC mengeluarkan RG 1.78 Tentang *Evaluating The Habitability Of A Nuclear Power Plant Control Room During A Postulated Hazardous Chemical Release* yang merupakan pedoman dalam melakukan kajian keselamatan kemampuan huni ruang kendali sewaktu dan setelah postulasi pelepasan eksternal bahan kimia berbahaya dari sumber tetap atau bergerak baik pada tapak ataupun luar tapak.

Selain itu, RG 1.78 juga memberikan asumsi dan kriteria penapisan kejadian pelepasan bahan kimia berbahaya yang tidak perlu dipertimbangkan dalam evaluasi kelayakan huni ruang kendali. Untuk lebih memudahkan proses evaluasi, pada dokumen tersebut juga dijabarkan metoda evaluasi rinci kelayakan huni ruang kendali dan kriteria penapisannya, seperti jarak antara sumber pelepasan dan ruang kendali, frekuensi pemindahan (untuk menghitung frekuensi pelepasan dari sumber bergerak), jumlah dan durasi pelepasan, tingkat toksisitas bahan kimia, kondisi meteorologi (untuk perhitungan dispersi), serta laju infiltrasi udara kedalam ruang kendali [5].

Pada RG 1.78 ini, diberikan identifikasi tentang jenis bahan berbahaya dan beracun yang dapat berpotensi menyebabkan ruang kendali reaktor menjadi tidak layak huni.

Sesuai dengan tujuan evaluasi tapak pada aspek bahan berbahaya dan beracun, maka RG ini dapat digunakan sebagai salah satu referensi untuk mengidentifikasi bahan berbahaya dan beracun apa saja yang perlu dipertimbangkan.

Secara umum, RG 1.78 menyebutkan bahwa untuk sumber tetap bahan berbahaya dan beracun ini akan diperhitungkan apabila berada dalam jarak radius 5 mil terhadap instalasi. Sedangkan jarak minimal bahan berbahaya dan beracun untuk dipertimbangkan dalam evaluasi kelayakan huni ruang kendali adalah jarak 0.3 mil dari ruang kendali dengan jumlah 100 pound.

Sedangkan untuk sumber bergerak, kriteria penapisan yang dipertimbangkan juga terkait dengan frekuensi perpindahan bahan berbahaya dan beracun tersebut dalam radius 5 mil dari instalasi. Batasan frekuensi untuk dilakukannya evaluasi kelayakan ruang kendali reaktor adalah 10 kali per tahun untuk pemindahan truk, 30 kali per tahun untuk penggunaan kereta, atau 50 kali per tahun untuk pemindahan menggunakan tongkang. Nilai frekuensi ini didasarkan pada nilai statistik yang relatif tetap setiap tahunnya.

RG 1.78 juga menjabarkan identifikasi jenis bahan kimia berbahaya dan beracun yang harus dipertimbangkan dalam evaluasi kelayakan huni ruang kendali seperti yang dapat dilihat pada tabel 4 berikut.

Tabel 4. Batas Toksisitas (Batas IDLH) Dari beberapa Bahan Kimia Berbahaya Berdasarkan Regulatory Guide 1.78

Chemical	Toxicity Limit <sup>a</sup>		Chemical	Toxicity Limit <sup>a</sup>	
	ppm <sup>b</sup>	mg/m <sup>3c</sup>		ppm <sup>b</sup>	mg/m <sup>3c</sup>
Acetaldehyde	2000	3600	Fluorine	25	50
Acetone	2500	6000	Formaldehyde	20	24
Acrylonitrile	85	149	Halon 1211	20000	
Anhydrous ammonia	300	210	Halon 1301	50000	
Aniline	100	380	Helium		asphyxiant
Benzene	500	1600	Hydrogen cyanide	50	55
Butadiene	2000	4400	Hydrogen sulfide	100	150
Butene		asphyxiant	Methyl alcohol	6000	7800
Carbon dioxide	40000	7360	Nitrogen (compressed or liquified)		asphyxiant
Carbon monoxide	1200	1320	Sodium oxide		2
Chlorine	10	30	Sulfur dioxide	100	520
Ethyl chloride	3800	9880	Sulfuric acid		15
Ethyl ether	1900	5700	Vinyl chloride	1000	2600
Ethylene dichloride	50	200	Xylene	900	3915
Ethylene oxide	800	720			

Batasan dalam Tabel 4 adalah didasarkan pada konsep tingkat paparan *immediately dangerous to life and health* (IDLH) yang dikembangkan oleh *National Institute for Occupational Safety and Health* (NIOSH). Nilai ambang ini didasarkan pada tingkat paparan 30 menit yang dapat menyebabkan kematian atau efek kesehatan yang merugikan secara permanen jika tidak diberikan perlindungan dalam 30 menit. Untuk setiap bahan tersebut, batas IDLH yang dapat ditoleransi adalah waktu 2 menit bagi kondisi personil normal. Oleh sebab itu, waktu paparan 2 menit pada batas IDLH merupakan margin dalam melindungi operator ruang kendali dan diharapkan operator dapat melakukan tindakan fungsi keselamatan yang diperlukan.

Daftar yang lebih lengkap dari batas atau ambang IDLH terdapat pada L.B. Sasser et al., *Recommendations for Revision of Regulatory Guide 1.78*, NUREG/CR-6624, USNRC, July 1999.3. NUREG ini akan dipaparkan lebih rinci pada bagian selanjutnya.

Selain memberikan identifikasi bahan berbahaya dan beracun, pada RG 1.78 juga diberikan metode sederhana untuk melihat apakah suatu bahan berbahaya dan beracun perlu untuk dipertimbangkan pada evaluasi ruang kendali terkait dengan jarak dan juga jumlah bahan berbahaya dan beracun. Hal tersebut secara umum dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 5. Berat Bahan Kimia Berbahaya Yang perlu Dipertimbangkan dalam Evaluasi Ruang Kendali (Untuk Batas Toksisitas 50 mg/m<sup>3</sup> dan kondisi Meteorologi Stabil) Berdasarkan Regulatory Guide 1.78

Distance From Control Room (miles) <sup>a</sup>	Weight (1000 lb)		
	Air Exchange Rate 0.015 per hour	Air Exchange Rate 0.06 per hour	Air Exchange Rate 1.2 per hour
0.3 to 0.5	9	2.25	0.11
0.5 to 0.7	35	8.75	0.43
0.7 to 1.0	120	30	1.5
1 to 2	270	67.5	3.37
2 to 3	1300	325	16.25
3 to 4	3700	925	46.25
4 to 5	8800	2200	110

<sup>a</sup> All hazardous chemicals present in weights greater than 100 lb within 0.3 mile of the control room should be considered in a control room evaluation.

Secara umum, jumlah bahan berbahaya dan beracun pada tabel di atas berdasarkan pada batas toksisitas 50 mg/m<sup>3</sup>; laju pertukaran udara 0.015, 0.06, dan 1.2 per jam; serta stabilitas Pasquill kategori F yang mengindikasikan 5 % kondisi meteorologi terburuk yang teramati pada sebagian besar tapak PLTN.

Jika tingkat toksisitas, laju pertukaran udara, atau kondisi meteorologi berbeda dengan asumsi yang diberikan pada tabel, maka dapat digunakan perhitungan sederhana untuk menentukan jumlah bahan kimia berbahaya dan beracun untuk dipertimbangkan dalam evaluasi ruang kendali.

Dari RG 1.78 ini, dapat digunakan beberapa informasi dalam proses identifikasi bahaya bahan berbahaya dan beracun yaitu :

- Tabel 1 yang berisi ambang IDLH dari berbagai bahan berbahaya dan beracun dapat digunakan sebagai daftar penapis bahan kimia yang perlu dipertimbangkan dalam evaluasi tapak khususnya dalam hal kelayakan huni ruang kendali.
- Tabel 2 dapat digunakan untuk menghitung jumlah bahan berbahaya dan beracun yang perlu dipertimbangkan dalam evaluasi kelayakan huni ruang kendali berdasarkan jarak antara sumber bahan berbahaya dan beracun terhadap instalasi nuklir.

### **Identifikasi Bahan Berbahaya dan Beracun Berdasarkan NUREG/CR-6624 Recommendations for Revision of Regulatory Guide 1.78**

NUREG/CR-6624 pada tahun 1999 ini merupakan sebuah laporan yang disiapkan untuk US NRC ketika akan melakukan revisi terhadap RG 1.78 tentang Assumptions For Evaluating The Habitability Of A Nuclear Power Plant Control Room During A Postulated Hazardous Chemical Release tahun 1974. Revisi RG 1.78 ini kemudian dikeluarkan dengan nama Regulatory Guide 1.78 revision 1 Tentang Evaluating The Habitability Of A Nuclear Power Plant Control Room During A Postulated Hazardous Chemical Release [6]

Salah satu tujuan dari revisi ini adalah untuk meninjau ulang jenis dan batasan bahan kimia berbahaya dan beracun yang terdapat pada RG 1.78 didasarkan pada hasil revisi konsentrasi IDLH oleh NIOSH pada tahun 1997. Nureg tersebut merekomendasikan penggunaan NIOSH Pocket Guide (NIOSH, 1997) yang berisi daftar bahan berbahaya dan beracun untuk digunakan sebagai referensi perubahan daftar dan batas bahan berbahaya dan beracun pada RG 1.78.

Meskipun demikian, pada RG 1.78 revisi 1 akhirnya hanya ditampilkan daftar contoh bahan kimia berbahaya yang sering digunakan serta yang sering dipindahkan dalam jumlah besar. Pada lampiran A NUREG tersebut disampaikan hasil revisi bahan beserta nilai IDLH yang ditetapkan oleh NIOSH yang merupakan daftar bahan berbahaya dan beracun sejumlah 406 bahan.

Dari NUREG/CR-6624 ini dapat digunakan informasi dalam proses identifikasi bahaya bahan berbahaya dan beracun yaitu penggunaan Appendix A sebagai salah satu referensi dalam melakukan proses identifikasi untuk menentukan apakah suatu bahan termasuk dalam bahan berbahaya dan beracun.

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

Dari hasil kajian yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa:

- Lampiran dari PP 74 tahun 2001 dapat digunakan sebagai alat untuk mengidentifikasi bahan-bahan yang berpotensi menimbulkan bahaya bagi instalasi nuklir berdasarkan aspek bahan berbahaya dan beracun.
- Lampiran Keputusan Menteri Tenaga Kerja R.I No. KEP. 187/MEN/1999 dapat digunakan sebagai identifikasi dari kuantitas, apakah bahan berbahaya dan beracun tersebut perlu mendapatkan perhatian untuk keperluan analisis lebih lanjut.
- Jenis bahan dan kuantitas pada RG 1.78 revisi 1 dapat digunakan sebagai salah satu penapisan dalam menentukan apakah suatu jumlah bahan kimia berbahaya dan beracun membutuhkan tahapan evaluasi lebih lanjut
- Nilai IDLH dari NIOSH pada NUREG/CR-6624 dapat digunakan sebagai pembanding dari lampiran PP 74 tahun 2001 untuk digunakan sebagai referensi dalam melakukan identifikasi bahan berbahaya dan beracun

Dokumen referensi yang digunakan dalam kajian ini disarankan dapat digunakan sebagai salah satu bahan rujukan dalam melengkapi Perka BAPETEN No. 6 Tahun 2008.

#### **DAFTAR PUSTAKA**

1. Peraturan Kepala BAPETEN No. 6 Tahun 2008, "Evaluasi Tapak Reaktor Daya Untuk Aspek Kejadian Eksternal Akibat Ulah Manusia", BAPETEN, Jakarta (2008)
2. Keputusan Menteri Tenaga Kerja R.I No. KEP. 187/MEN/1999, "Pengendalian Bahan Kimia Berbahaya di Tempat Kerja", Jakarta (1999)
3. Peraturan Pemerintah No. 74 tahun 2001, "Pengelolaan Bahan Berbahaya dan Beracun", Jakarta (2001)
4. Regulatory Guide 1.78, "Assumptions For Evaluating The Habitability Of A Nuclear Power Plant Control Room During A Postulated Hazardous Chemical Release", US-NRC, Amerika Serikat (1974)
5. Regulatory Guide 1.78 revision 1,"Evaluating The Habitability Of A Nuclear Power Plant Control Room During A Postulated Hazardous Chemical Release", US-NRC, Amerika Serikat (2001)
6. NUREG/CR-6624, "Recommendations for Revision of Regulatory Guide 1.78", US-NRC, Amerika Serikat (1999)

#### **DISKUSI/TANYA JAWAB**

##### **1. PERTANYAAN**

Tadi dipaparkan identifikasi bahan berbahaya dan beracun yang berpotensi membahayakan ke Ruang Kendali. Apakah pada saat evaluasi tapak harus sudah tersedia desain ruang kendali?

##### **JAWABAN**

Ketika evaluasi tapak, tentu saja tidak diperlukan desain ruang kendali. Untuk keperluan evaluasi bahan berbahaya dan beracun terhadap ruang kendali, dapat digunakan perkiraan lokasi saja yang kemudian digunakan sebagai titik/lokasi acuan antara ruang kendali dengan lokasi bahan berbahaya dan beracun sekitar calon tapak instalasi nuklir.

Halaman ini sengaja di kosongkan

## KAJIAN FAUNA DI PROPINSI NUSA TENGGARA BARAT (NTB): STUDI KASUS RENCANA PEMBANGUNAN PLTN

June Mellawati\*, Merri Suhartini\*\*

<sup>1</sup>Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi, BATAN, Jl. Lebak Bulus Raya 49,  
Ps. Jumat PO Box 7043, Jaksel 12070, june\_mellawati@yahoo.co.id

<sup>2</sup>Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi, BATAN, Jl. Lebak Bulus Raya 49, Ps. Jumat Jaksel

### ABSTRAK

**KAJIAN FAUNA DI PROPINSI Nusa Tenggara Barat (NTB): STUDI KASUS RENCANA PEMBANGUNAN PLTN.** Untuk kegiatan pra-studi kelayakan tapak PLTN di NTB perlu dilengkapi data fauna terkait dengan dampak yang diperkirakan dapat mengganggu habitatnya ketika kegiatan prakonstruksi dan konstruksi. Tujuan penelitian adalah memperoleh data fauna endemik, langka, dan terancam punah yang dapat digunakan sebagai *data base* rona awal NTB. Metode penelitian meliputi pengumpulan data sekunder kawasan hutan di NTB, kegiatan identifikasi, evaluasi dan analisis data status fauna. Kegiatan dilakukan pada bulan Desember 2017 - Mei 2018. Lokasi kajian meliputi kawasan daratan sekitar pantai dan pulau-pulau di NTB. Hasil penelitian menunjukkan bahwa di NTB terdapat berbagai spesies endemik yang ditemukan di hutan konservasi dan lindung, yaitu seperti Musang rinjani (*hemaproditus rinjanicus*), rusa timor (*Cervus timorensis*), dan beberapa spesies burung endemik, seperti Koakiau (*Philemon buceroides*), burung madu (*Lichmera lombokia*), beo sumbawa (*Gracula religiosa*), Elang Tikus (*Elanus caeruleus*), Uncal Buau (*Macropygia emiliana*), Walik Putih (*Ptilinopus cinctus*), Anis Nusa Tenggara (*Zoothera dohertyi Paradoxurus*), serta berbagai spesies kupu-kupu, seperti *Troides Helena*, *Papilio helenus*, *Papilio memnon*, *Graphium sarpedon*, *Moduza prochris*. Selain itu spesies terancam punah, yaitu trenggiling (*Manis javanica*) jumlahnya kini menurun karena ulah manusia. Berdasarkan hal ini beberapa wilayah, seperti Sembalun Kabupaten Lombok Timur, Bima, Pulau Mojo Kabupaten Sumbawa, Pulau Satonda Kabupaten Dompu, Bangko-bangko, Pelangan, Kerandangan, Suranadi Lombok Barat, Pujut Lombok Tengah, Pedauh, Jereweh, Sumbawa Barat, NTB perlu dipertimbangkan untuk dihindari sebagai tapak PLTN terkait dengan keberadaan fauna endemik dan terancam punah.

Kata kunci: fauna, tapak, PLTN, NTB

### ABSTRACT

**FAUNA STUDY IN PROVINCE OF WEST NUSA TENGGARA (NTB): CASE STUDY OF NUCLEAR POWER PLANT DEVELOPMENT PLAN.** For pre-feasibility activities of the NPP sites in NTB need to be equipped with fauna data related to impacts that might disturb their habitat when pre-construction and construction activities. The objective of the study was to obtain endemic, rare, and endangered fauna data that could be used as NTB baseline data. The research method includes collecting secondary data of forest area in NTB, identification activity, evaluation and data analysis of fauna status. Activities are conducted from December 2017 to May 2018. The study location covers the land area around the coast and islands in NTB. The results show that in NTB there are various endemic species found in conservation and protection forests, ie. rinjani weed species (*hemaproditus rinjanicus*), wild boar (*sus sp.*), deer timor (*Cervus timorensis*), and several species of endemic birds, such as Koakiau (*Philemon buceroides*), honeybee (*Lichmera lombokia*), sumbawa parrot (*Gracula religiosa*), Rat Eagle (*Elanus caeruleus*), Uncal Buau (*Macropygia emiliana*), Walik Putih (*Ptilinopus cinctus*), Anis Nusa Tenggara (*Zoothera dohertyi Paradoxurus*) as well as various species of butterflies, namely *Troides Helena*, *Papilio helenus*, *Papilio memnon*, *Graphium sarpedon*, *Moduza prochris* are found in the NTB region and include protected. In addition, endangered species, namely pangolins (*Manis javanica*), are now declining due to human activities. Based on this, several regions, such as Sembalun, East Lombok Regency, Bima, Mojo Island, Sumbawa Regency, Satonda Island, Dompu Regency, Bangko-bangko, Pelangan, Kerandangan, Suranadi, West Lombok, Pujut, Central Lombok, Pedauh, Jereweh, West Sumbawa, NTB need to be considered. to be avoided as a PLTN site related to the presence of endemic and endangered fauna.

Keywords: fauna, site, NPP, NTB

## PENDAHULUAN

Provinsi NTB memiliki potensi energi terbarukan yang cukup melimpah, di antaranya energi air, arus laut, panas bumi, angin, biomassa, biogas dan surya, namun pemanfaatannya masih terbatas karena pertimbangan biaya dan teknologi (1-4). Sejauh ini, energi terbarukan yang dikembangkan masih sebatas energi air berskala kecil melalui pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) dan Pembangkit Listrik Tenaga Minihidro (PLTM), energi surya untuk penerangan rumah tangga perdesaan, serta pemanfaatan biogas dan biomassa untuk bahan bakar memasak berskala rumah tangga. Di masa mendatang diperkirakan Provinsi NTB akan membutuhkan energi listrik cukup besar terkait rencana dibangunnya KEK Mandalika, pengembangan Global Hub di Lombok Utara, pembangunan smelter di Pulau Sumbawa dan sejumlah investasi lainnya sehingga tidak dapat hanya mengandalkan pembangkit tenaga uap atau diesel saja, dan PLTN menjadi alternatif untuk dikembangkan(5). Kegiatan *Pre-Feasibility Study* (kajian kelayakan awal) calon tapak telah dilakukan di NTB sebagai langkah awal apabila kelak NTB akan membangun PLTN atau fasilitas nuklir(6). Distamben NTB dan BATAN sepakat melakukan penelitian dan kajian tapak PLTN di Provinsi NTB. Pembangkit listrik di NTB baik milik PLN maupun swasta didominasi oleh sumber energi konvensional (batu bara dan bahan bakar minyak). Sebesar 500 MW yang diperoleh NTB dari program nasional 35.000 MW yang dicanangkan Pemerintah bersumber dari energi tidak dapat diperbarui, dan BATAN bersama Pemda NTB berencana melaksanakan penelitian tersebut terkait persiapan pembangunan PLTN yang pendanaannya menggunakan APBN (BATAN) dan APBD (Pemerintah NTB) (7). Dalam Undang Undang No. 32 Tahun 2009 dinyatakan bahwa kegiatan berisiko tinggi terhadap lingkungan, seperti halnya nuklir diwajibkan untuk melakukan kajian AMDAL, dan hal ini termasuk perlindungan dan pengelolaan lingkungan hidup yang dilaksanakan berdasarkan asas ekoregion, yaitu terhadap fauna(8).

Secara ekologis, wilayah NTB mempunyai nilai karakteristik fauna (satwa) karena berada di lintasan garis Wallacea sebagai peralihan ekologis antar benua Asia dan Australia. Wilayah NTB mempunyai keanekaragaman hayati berbeda pada tingkat jenis dan tingkat ekosistemnya dibanding dengan daerah lain di Indonesia. Penyebaran jenis fauna bervariasi terkait hubungannya dengan ekosistem setempat, karena adanya kesesuaian jenis dengan habitat tempat tumbuhnya atau tempat berkembangnya suatu jenis. Adanya perubahan kondisi ekosistem akan memberi pengaruh nyata pada perubahan variasi jenis, karena ketidakmampuan menyesuaikan diri dengan perubahan habitat sehingga akan mengalami kepunahan bahkan mengalami kematian(9).

Kawasan hutan adalah wilayah tertentu yang ditunjuk dan atau ditetapkan oleh pemerintah untuk dipertahankan keberadaannya sebagai hutan tetap, hal ini karena kawasan hutan merupakan habitat fauna yang mempunyai fungsi sebagai kawasan konservasi, lindung, dan kawasan produksi[9]. Hutan beserta isinya (fauna) merupakan suatu kesatuan ekosistem yang tidak dapat dipisahkan satu dengan lainnya[10]. Fauna adalah semua jenis sumber daya alam hewani yang hidup di darat, dan atau di air, dan atau di udara. Sebagai penopang kehidupan bagi fauna yang mempunyai keanekaragaman hayati dan ekosistem bervariasi, hutan perlu dipertahankan keberadaannya. Namun demikian, hingga kini keanekaragaman hayati fauna kian menurun akibat perambahan hutan, konversi lahan hutan, eksploitasi berlebihan, praktik teknologi yang berpotensi merusak, perubahan iklim dan sebagainya.

Keanekaragaman fauna yang bersifat khas, langka dan dapat terancam punah sehingga perlu dilindungi dan dilakukan tindakan keselamatan agar keberlanjutan tetap terjaga(11). Perlindungan berbagai jenis fauna yang khas, langka dan terancam punah akibat kegiatan manusia diatur dalam Peraturan Pemerintah No 68 Tahun 1998(12). Secara umum data tentang rona lingkungan hidup awal (*environmental setting*) di lokasi yang terdapat kegiatan ketenaganukliran sangat diperlukan terkait dengan dampak yang mungkin ditimbulkannya.

Seperti diketahui, radiasi dari energi nuklir dapat mempengaruhi populasi hewan dan hal ini dipelajari pasca kejadian kecelakaan nuklir di kawasan PLTN Fukushima Daiichi Jepang dan Chernobyl di USSR. Data menunjukkan bahwa radiasi menyebabkan efek buruk pada tingkat fisiologis dan genetis beberapa spesies kupu-kupu biru (*Zizeeria maha*: pemakan tanaman pendek di permukaan tanah) yang hidup di kawasan PLTN Fukushima Daiichi Jepang(13). Akhirnya spesies tersebut dijadikan spesies indikator untuk memantau efek biologis pencemar lingkungan di habitat manusia. Efek kecelakaan PLTN tidak hanya

mempengaruhi fisiologis dan genetis, seperti peningkatan morfologi, fisiologi, kelainan genetik, angka mutasi, abnormalitas perkembangan, morbiditas onkologi, mempercepat penuaan, mengurangi kadar antioksidan tubuh, tetapi juga dapat mempengaruhi konsekuensi ekologis, seperti mengurangi kelangsungan hidup, reproduksi dan kelimpahan spesies(14).

Berdasarkan hal tersebut, tujuan penelitian adalah memperoleh data fauna khas, langka, dan terancam punah yang dapat digunakan sebagai *data base* untuk rona awal NTB. Diharapkan data ini dapat digunakan oleh stakeholder untuk menghindari kawasan konservasi dan kawasan lindung di NTB yang merupakan habitat fauna beserta ekosistemnya dalam penetapan lokasi tapak PLTN.

## **METODOLOGI**

### **Waktu dan Lokasi Kegiatan**

Penelitian dilakukan pada bulan Desember 2017 hingga Mei 2018. Lokasi penelitian daerah terestrial kawasan hutan Provinsi NTB yang meliputi Pulau Lombok, Sumbawa dan sekitarnya dengan cakupan wilayahnya meliputi daerah terestrial sekitar pantai.

### **Tahapan Penelitian**

Pada penelitian ini dilakukan studi pustaka untuk mengumpulkan data sekunder daerah penelitian dari BPS(15), Kementerian dan Dinas Lingkungan Hidup & Kehutanan (9,16). Selanjutnya dilakukan identifikasi dan inventarisasi data, serta analisis dan evaluasi data untuk mengetahui sebaran dan statusnya. Analisis dilakukan terhadap habitat fauna, dalam hal ini keberadaan hutan yang ada di daerah penelitian dan spesies fauna yang ada di kawasan hutan tersebut, khususnya hutan konservasi dan hutan lindung.

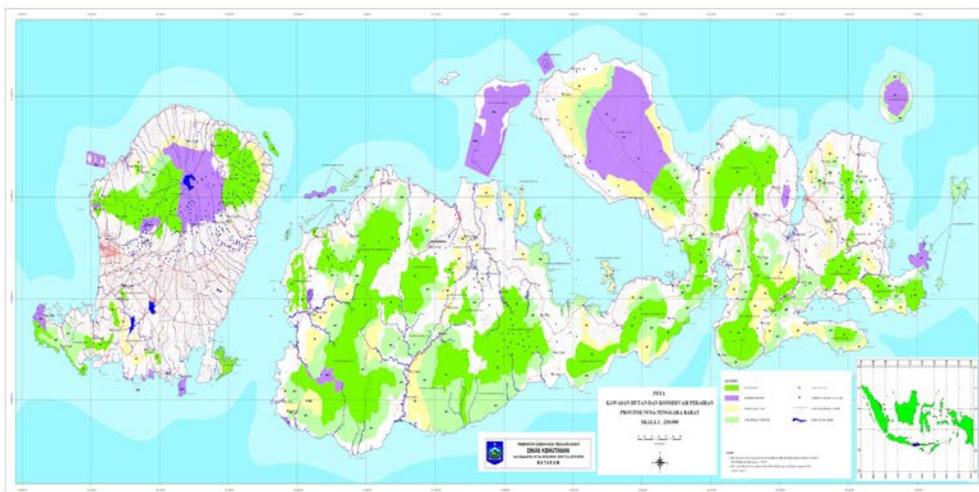
## **HASIL DAN PEMBAHASAN**

### **Kondisi Umum Daerah Penelitian**

Data BPS (15) mencatat bahwa Provinsi NTB mempunyai 8 kabupaten, 2 kotamadya, 116 kecamatan dan 1.141 kelurahan (desa). Lokasinya terletak di antara 80 10'-90 5' LS dan 1150 46'- 1190 5' BT, mempunyai luas wilayah 20.153,20 km<sup>2</sup>, terdiri dari 2 pulau besar yaitu Pulau Lombok (4.738,70 km<sup>2</sup>) dan Sumbawa (15.414.50 km<sup>2</sup>), serta ± 279 pulau-pulau kecil yang hanya sebanyak 44 nya telah berpenghuni. Daerah tertinggi di NTB adalah kota Selong, 166 m dpl dan terendah Taliwang 11 m dpl. Provinsi NTB mempunyai 7 gunung di Pulau Lombok, dan yang tertinggi adalah Gunung Rinjani (3.726 m dpl) dan 9 gunung di Pulau Sumbawa, dan yang tertinggi adalah Gunung Tambora.

### **Kawasan Hutan di NTB**

Kehidupan fauna tidak terlepas dari keberadaan hutan, mengingat hutan merupakan habitatnya. Kawasan hutan yang ada di NTB merupakan habitat dari kedua jenis keanekaragaman hayati tersebut yang kini mulai menyusut akibat berbagai kegiatan manusia. Kawasan hutan yang ada di NTB terdiri dari "hutan konservasi (suaka dan cagar alam, suaka margasatwa, kawasan pelestarian alam (taman nasional), hutan rakyat, wisata alam, dan taman buru)", adalah hutan dengan ciri flora dan fauna karakteristik yang manfaatnya adalah mengawetkan keanekaragaman flora dan fauna beserta ekosistemnya, "hutan lindung", adalah hutan yang manfaatnya melindungi sistem penyangga kehidupan flora dan fauna dengan mengatur tata air, mencegah banjir, mengendalikan erosi, mencegah intrusi air laut dan memelihara kesuburan tanah, serta "hutan produksi (hutan produksi tetap, hutan produksi terbatas dan hutan produksi yang dapat dikonversi)" yang berfungsi memproduksi hasil hutan untuk penyedia flora, fauna dan manusia yang hidup di sekitarnya(16). Kawasan hutan di NTB ditunjukkan pada Gambar 1 dan Tabel 1, sedangkan peta sebaran hutan konservasi di NTB ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 1. Sebaran Wilavah Hutan di NTB(16)



Gambar 2. Hutan Konservasi di NTB(16)

Tabel 1. Jenis Hutan di NTB dan Luas Areanya(15,16)

No.	Hutan	Luas area (Ha)
1	Hutan Konservasi	173.636,40
	a. Cagar Alam	36.832,61
	b. Gunung Rinjani (Taman Nasional)	41.330
	c. Gunung Tambora (Taman Nasional)	71.645,64
	d. Taman Buru	48.668,05
	e. Taman wisata alam	21.976,06
	f. Taman hutan raya	3.155,00
2	Hutan Lindung	444.149,86
3	Hutan Produksi	450.813,57
	a. Hutan produksi tetap	160.250,74
	b. Hutan produksi Terbatas	293.685,83

Berdasarkan data Tabel 1 dapat diketahui bahwa di NTB terdapat 3 jenis hutan yang terdiri dari hutan konservasi, hutan lindung dan hutan produksi dengan luas keseluruhan 1.746.143,76 Ha. Pada Gambar 1 dan 2 terlihat bahwa hutan lindung di NTB sedikit lebih luas dibandingkan hutan konservasi, dan hutan produksi lebih luas dibandingkan hutan lindung maupun hutan konservasi. Hal ini menunjukkan bahwa sebagian wilayah hutan lindung dan hutan konservasi telah beralih fungsi menjadi hutan produksi guna menyangga kehidupan masyarakat setempat. Konsekuensi dari pemetaan wilayah hutan yang dilakukan pemerintah menyebabkan: (i) luputnya perlindungan keanekaragaman hayati dan spesies terancam punah, (ii) tumpang tindih tataguna hutan dan kawasan pertanian (17).

Hutan konservasi dan hutan lindung merupakan habitat fauna yang tak dapat diganggu gugat karena hutan tersebut dimaksudkan untuk: (i) menjaga berlangsungnya proses ekologis dan sistem kehidupan, (ii) menjaga keanekaragaman genetika fauna, serta (iii) menjamin kelestarian pemanfaatan mahluk hidup dan ekosistemnya. Apabila status ekosistem hutan berubah, maka status faunapun dapat menjadi langka dan terancam punah. Data hutan konservasi yang terdiri dari cagar alam, taman nasional, taman buru maupun taman wisata, serta hutan lindung yang ada di NTB ditunjukkan pada Tabel 2 berikut:

**Tabel 2. Hutan, Luas Area dan Lokasinya di NTB(16)**

No.	Nama	Luas Area (Ha)	Lokasi (Kecamatan, Kabupaten)
1	Kerandangan	396,10	Batu Layar, Lombok Barat
2	Suranadi	55	Narmada, Lombok Barat
3	Bangko Bangko, Desa Pelangan	2.169	Sekotong, Lombok Barat
4	Pelangan,Desa Pelangan	310,17	Sekotong, Lombok Barat
5	Gunung Tunak, Ds Mertak	312	Pujut, Lombok Tengah
6	Tanjung Tamba	931,40	Pujut, Lombok Tengah
7	Pulau Panjang	1641,25	Alas, Sumbawa
8	Danau Rawa Taliwang, Ds Seloto,Sampir, Meraran,	819,20	Seteluk, Sumbawa
9	Cagar alam Pedauh	524	Sekongkang, Sumbawa Barat
10	Hutan Jereweh, Ds Mataiyang & Desa Beru	26.019	Jereweh & Brang Ene Sumbawa Barat
11	Pulau Moyo,		Sumbawa Barat
12	Semongkat, Desa. Kelungkung	100,5	Batu lanteh, Sumbawa
13	Madapangga, Ds.Ndano	232	Bima
14	Pulau Satonda, Ds Nangamiro	2600 (453,70 darat & 2146,3 perairan)	Pekat, Bima
15	Gunung Tambora, Dompou & Sangia	26.130,25	Tambora Selatan, Bima
16	Toffo Kota Lambu	3.340	Bima
17	Pulau Sangiang	7.492,75	Bima
18	Gunung Rinjani	40.000	Lombok Barat, Tengah, dan Lombok Timur

Dalam dokumen IAEA *Safety Series* No. 50-SG-S5 tahun 1981 dinyatakan bahwa keberadaan hutan merupakan salah satu kejadian pemicu awal (*initiating events*) yang harus dipertimbangkan pada penetapan calon tapak(18). Kejadian pemicu awal tersebut adalah kejadian kebakaran, dan untuk hal tersebut IAEA memberikan rekomendasi nilai jarak penapisan (*screening distance value /SDV*) "hutan" terhadap instalasi nuklir (PLTN) sebesar 2 km. Artinya penempatan tapak tidak perlu dipertimbangkan bila jarak terhadap hutan lebih dari 2 km. Seperti halnya di India, kasus kebakaran hutan di sekitar tapak PLTN dapat mengganggu kehidupan fauna(19). Artinya sebagai sumber eksternal, instalasi nuklir mempunyai potensi dapat mengganggu hutan yang merupakan habitat fauna. Hal ini didukung oleh penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa kecelakaan PLTN di Turki telah menyebabkan kerusakan permanen pada keanekaragaman hayati dan pengaruhnya meluas hingga ke Azerbaijan, Georgia, dan Iran(20).

#### **Fauna (Satwa) Terrestrial**

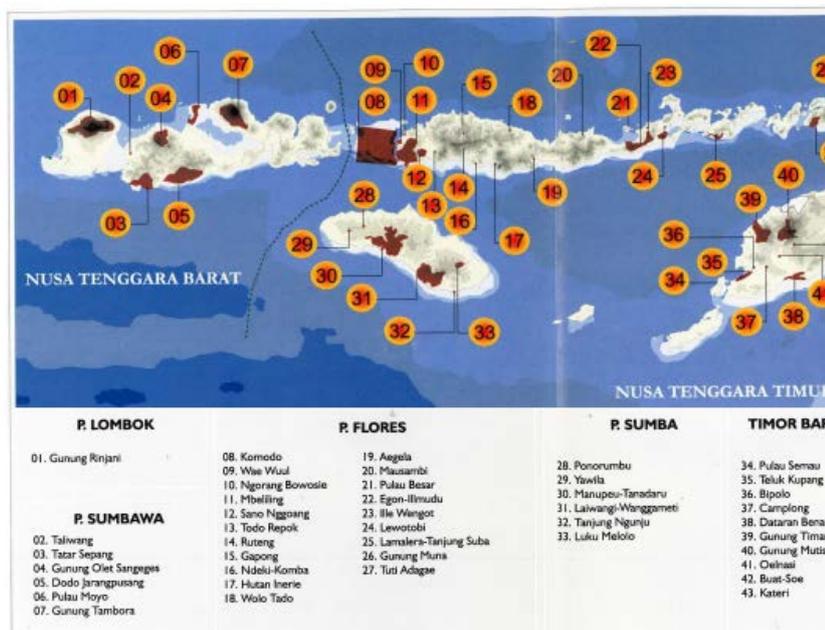
Berdasarkan data sekunder diperoleh informasi bahwa di NTB terdapat beberapa jenis fauna kelompok reptil, mamalia, unggas dan berbagai jenis kupu-kupu, serta fauna lainnya, seperti ditunjukkan pada Tabel 3. Sebaran burung di Nusa Tenggara ditunjukkan pada Gambar 3.

**Tabel 3. Data Sebaran Fauna di NTB(16,21,22)**

Nama Daerah (Nama Latin) Fauna	Lokasi
<u>Unggas:</u> Burung elang bondol ( <i>Haliastur indus</i> ), koakiau ( <i>Philemon buceroides</i> ), raja udang ( <i>Halcyon</i> sp), Kirik-kirik Australia ( <i>Merops ornatus</i> ) dan Elang Laut ( <i>Haliaeetus leucogaster</i> ), Ayam Hutan ( <i>Gallus</i> sp). Kupu-kupu langka & dilindungi ( <i>Troides Helena</i> , <i>Papilio helenus</i> , <i>Papilio memnon</i> , <i>Graphium sarpedon</i> , dan <i>Moduza prochris</i> , serta Trenggiling ( <i>Manis javanica</i> )	Bangko bangko, Lombok barat
<u>Unggas:</u> Burung koakiau ( <i>Philemon buceroides</i> ), Elang Bondol ( <i>Haliastur indus</i> ), Ayam Hutan ( <i>Gallus</i> sp). <u>Mamalia:</u> Rusa ( <i>Cervus timorensis</i> ), Kijang ( <i>Muntiacus muntjak</i> ), Monyet ekor panjang ( <i>Macaca fascicularis</i> ), lutung ( <i>Tracyptithecus auratus kohlbroggei</i> , sody), musang ( <i>hemaproditus</i> sp).	Pelangan, Sekotong, Lombok Barat
<u>Unggas:</u> Burung cerucukan ( <i>Pycnonotus goaivier</i> ), Koakiau	Kerandangan, Batu

<p>(<i>Philemon buceroides</i>), Kecial Kuning (<i>Zosterops palpebrosus</i>), Srigunting (<i>Dicrurus densus</i>), Raja Udang Biru (<i>Halcyon chloris</i>), Kepodang (<i>Oriolus chinensis</i>). <u>Reptil</u>: Biawak (<i>Varanus salvator</i>). <u>Mamalia</u>: Kera ekor panjang (<i>Macaca fascicularis</i>), Kera hitam (lutung) (<i>Tracypithecus auratus</i>). Kupu-kupu dilindungi diantaranya adalah <i>Troides Helena</i>, <i>Papilio helenus</i>, <i>Papilio memnon</i>, <i>Graphium sarpedon</i>, dan <i>Moduza prochris</i>.</p>	<p>layar, Lombok Barat</p>
<p><u>Mamalia</u>: Kera abu-abu (<i>Macaca fascicularis</i>). Kupu-kupu (<i>Troides Helena</i> <i>Papilio helenus</i>, <i>Papilio memnon</i>, <i>Graphium sarpedon</i>, <i>Moduza prochris</i>.</p>	<p>Suranadi, Narmadi Lombok Barat</p>
<p><u>Mamalia</u>: Monyet ekor panjang (<i>Macaca fascicularis</i>), musang (<i>Paradoxurus hermaphroditus</i>). <u>Reptil</u>: ular sanca batik (<i>Phiton raticulatus</i>), biawak (<i>Varanus salvator</i>). <u>Unggas</u>: Burung tekukur (<i>Spilopelia chinensis</i>), raja udang (<i>Halcyon</i> sp), elang bondol (<i>Haliastur indus</i>), koakiau (<i>Philemon buceroides</i>), kuntul putih (<i>Egretta garzetta</i>), ayam hutan (<i>Gallus</i> sp)</p>	<p>Tanjung Tamba, Praya barat/Pujut, Lombok Tengah</p>
<p><u>Mamalia</u>: Rusa (<i>Cervus timorensis</i>), Kijang (<i>Muntiacus muntjak</i>), Babi Hutan (<i>Sus vittatus</i>), Landak (<i>Hystrix javanica</i>), Monyet (<i>Macaca fascicularis</i>), Lutung (<i>Trachypithecus auratus</i>), Musang Rinjani (<i>hemaproditus rinjanicus</i>), Kelelawar Buah (<i>Macroglossus minimus</i>). <u>Unggas</u>: Bondol taruk (<i>Lonchura molucca</i>), Burung Kakatua Putih Kecil (<i>Cacatua sulphurea occidentalis</i>), Burung Madu (endemik) (<i>Lichmera lombokia</i>), Uncal Buau (<i>Macropygia emiliana</i>), Walik Putih (<i>Ptilinopus cinctus</i>), Walik kembang (<i>Ptilinopus melanospila</i>), Anis Nusa Tenggara (<i>Zoothera dohertyi Paradoxurus</i>), Pipit benggala (<i>Amandava amandava</i>), burung kacamata/pleci (<i>Zosterops montanus</i>), gelatik (<i>Parus</i> sp.), burung tui (<i>Novaeseelandiae</i>), Ayam Hutan Merah (<i>Gallus gallus</i>), Ayam Hutan Hijau (<i>Gallus varius</i>).</p>	<p>Gunung Rinjani, Sembalun Lombok Timur (22)</p>
<p><u>Unggas</u>: Burung cikukua Tanduk/Koakiau (<i>Philemon buceroides</i>), Kecial Cumbuk/Sesap Madu Topi Sisik (<i>Lichmera lombokia</i>), Raja Udang Biru (<i>Halcyon chloris</i>), Raja Udang Merah (<i>Halcyon</i> sp), Kelutuk/Bubut Alang-alang (<i>Centropus bengalensis</i>), Kecial Kuning (<i>Zosterops palpebrosus</i>), Punglor Merah (<i>Zoothera interpres</i>), Burung Gosong kaki merah (<i>Megapodius reinwardtii</i>), Koakiau (<i>Philemon buceroides</i>), Kuntul karang (<i>Egretta sacra</i>), Kowak malam merah (<i>Nycticorax caledonicus</i>), Trinil (<i>Tringa</i> sp), Kirik-kirik Australia (<i>Merops ornatus</i>), Kepodang (<i>Oriolus chinensis</i>). <u>Mamalia</u>: Rusa (<i>Cervus timorensis</i>), Babi hutan (<i>Sus</i> sp). Kupu-kupu (<i>Troides Helena</i>, <i>Papilio helenus</i>, <i>Papilio memnon</i>, <i>Graphium sarpedon</i>, <i>Moduza prochris</i>), serta Trenggiling (<i>Manis javanica</i>).</p>	<p>Gunung Tunak, Pujut, Lombok Tengah</p>
<p><u>Unggas</u>: Burung belibis (<i>Carina scutulata</i>), bangau (<i>ciconiidae</i> sp), wili wili (<i>Esacus magnirostis</i>), elang laut (<i>Heliaeetus leucogaster</i>), angsa (<i>Cygnini</i> sp).</p>	<p>Pedauh, Kec.Sekongkang, Sumbawa Barat</p>
<p><u>Mamalia</u>: rusa (<i>Cervus timorensis</i>), monyet ekor panjang (<i>Macaca fascicularis</i>), babi hutan (<i>Sus</i> sp.). <u>Reptilia</u>: ular Sanca Batik (<i>Phiton raticulatus</i>), biawak (<i>Varanus salvator</i>). <u>Unggas</u>: spesies burung kakatua kecil jambul kuning (<i>Cacatua sulphurea</i>), Bangau Sandang Lawe (<i>Ciconia episcopus</i>), Nuri Pipi Merah (<i>Geoffroyus geoffroyi</i>), Beo Sumbawa (<i>Gracula regiosa</i>), elang bondol (<i>Haliastur indus</i>), Madu Matari (<i>Nectarinia scolaris</i>), Paok Laos (<i>Pitta elegans</i>, Burung Anis (<i>Zoothera</i> sp)</p>	<p>Jereweh, Sumbawa Barat</p>
<p><u>Unggas</u>: Burung Cerucuk (<i>Pycnonotus goiavier</i>), Srigunting (<i>Dicrurus</i> sp), Elang Bondol (<i>Haliastur Indus</i>), Ayam Hutan (<i>Gallus</i> sp). <u>Mamalia</u>: Monyet Ekor Panjang (<i>Macaca fascicularis</i>), Babi Hutan (<i>Sus scrova</i>),</p>	<p>Semongkat, Desa Kelungkung, Kecamatan Batu Lante, Sumbawa</p>
<p><u>Unggas</u>: Burung Kuntul Besar (<i>Egretta alba</i>), Kuntul Kerbau (<i>Bulbulcus ibis</i>), Elang Bondol (<i>Haliastur indus</i>), Burung: Cangk</p>	<p>Danau Rawa Taliwang, Sumbawa Barat</p>

Merah ( <i>Ardea purpurea</i> ), Blekok Sawah ( <i>Ardeola speciosa</i> ), Kowak Malam Abu ( <i>Nycticorax nycticorax</i> ), Belibis Kembang ( <i>Dendrocygna arcuata</i> ), Mandar Besar ( <i>Porphyrio porphyrio</i> ), Mandar Batu ( <i>Gallinula chloropus</i> ), Burung Sepatu Jengger ( <i>Irediparra gallinacea</i> ), Berkik Kembang Besar ( <i>Rostratula bengalensis</i> ), Koreo Padi ( <i>Amauornis phoenicurus</i> ).	
<u>Mamalia</u> : Rusa timor ( <i>Cervus timorensis</i> ), banteng ( <i>Bos javanicus</i> ), babi hutan ( <i>Sus scrofa</i> ), Kera Ekor Panjang ( <i>Macaca fascicularis</i> ), Landak ( <i>Hystrix javanica</i> ). <u>Unggas</u> : Burung nuri merah dada ( <i>Tricoglossus haematodus</i> ), burung Koakiau ( <i>Philemon buceroides</i> ), burung kakatua jambul kuning ( <i>Cacatua sulphurea</i> ), dan burung gosong ( <i>Megapodius reinwardtii</i> ), burung beo Sumbawa ( <i>Gracula religiosa venerata</i> ), Punglor ( <i>Zoothera</i> sp), Ayam Hutan ( <i>Gallus</i> sp).	Pulau Moyo, Sumbawa(19)
<u>Unggas</u> : Burung rajaudang, kecial ( <i>Zootherops</i> sp), kuntul karang, gosong ( <i>Megapodius reinwardtii</i> ), kuntul merah, little terns ( <i>Sterna albifrons</i> )	Pulau Panjang, Sumbawa
<u>Unggas</u> : Burung Kakatua Kecil Jambul Kuning ( <i>Cacatua sulphurea</i> ), Nuri Kepala Merah ( <i>Geofroyus geofroyyi</i> ), Kirik-kirik Australia ( <i>Merops ornatus</i> ), , Srigunting ( <i>Dicrurus densus</i> ), Bentet kelabu ( <i>Lanius scach</i> ), Punglor Kepala Hitam ( <i>Zoothera doherty</i> ), Isap Madu Australia ( <i>Lichmera indistincta</i> ), Isap Madu Topi Sisik ( <i>Lichmera lombokia</i> ), Alap-alap layang ( <i>Falco cinerhoides</i> ), Isap Madu Topi Sisik ( <i>Lichmera lombokia</i> ), Elang bondol ( <i>Haliastur indus</i> ), Ayam Hutan Hijau ( <i>Gallus gallus</i> ). <u>Mamalia</u> : Rusa Timor ( <i>Cervus timorensis</i> ), Kera abu-abu ( <i>Macaca fascicularis</i> ), Babi Hutan ( <i>Sus scrova</i> ). <u>Reptilia</u> : Biawak ( <i>Varanus salvator</i> ), Ular piton ( <i>Phyton</i> sp).	Gunung Tambora,
<u>Reptilia</u> : Penyu sisik ( <i>Eretmochelys imbricata</i> ), <u>Mamalia</u> : kera ekor panjang ( <i>Macaca fascicularis</i> ), <u>Unggas</u> : burung Gosong ( <i>Megapodius reinwardt</i> ), Elang Bondol/laut ( <i>Haliastur indus</i> ), Ayam Hutan ( <i>Gallus</i> sp), <u>Mamalia</u> : Rusa Timor ( <i>Cervus timorensis</i> ),	Pulau Satonda, Kab. Dompu & Bima
<u>Unggas</u> : burung merpati ( <i>Streptolia chinensis</i> ), tekukur loreng ( <i>Geopelia maugei</i> ), alang-alang bubut ( <i>Centropus bengalensis</i> ), raja udang biru ( <i>Alcedo courelescens</i> ), raja udang eurasia ( <i>Alcedo courelescens</i> ), cekakak sungai ( <i>Halcyons</i> sp.), Kirik-Kirik ( <i>Merops</i> sp.), burung kaca mata ( <i>Zoosterops</i> sp.), burung isap madu ( <i>Nectarinia</i> spp), cici padi ( <i>Cisticola</i> sp.), dan bondol taruk ( <i>Lochua Maluku</i> ), ayam hutan ( <i>Galus</i> sp.), dan <u>burung pemangsa/predator</u> : elang bondol ( <i>Haliastur indus</i> ), elang laut perut putih ( <i>Haliaeetus leucogaster</i> ). <u>Mamalia</u> : babi hutan ( <i>Sus</i> sp.), rusa ( <i>Cervus timorensis</i> ), kera ekor panjang ( <i>Macaca fascicularis</i> ). <u>Reptil</u> : biawak ( <i>Varanus salvator</i> ), ular ( <i>Python raticulatus</i> ).	Toffo Kota Lambu Bima
<u>12 jenis burung predator</u> : <i>haliastur indus</i> , <i>accipiter virgatus</i> , <i>a. Gularis</i> , <i>circus assimilis</i> , <i>falco cenchroides</i> , <i>spizaetus cirhatus</i> , <i>otus</i> sp., <i>circaetus gallicus</i> , <i>hieeraetus fascitus</i> , <i>H. Kienerii</i> .	Cagar alam Pulau Sangiang, Kec. Wera, Kabupaten Bima



**Gambar 3. Sebaran fauna kelompok unggas (burung) di Nusa Tenggara (23)**

Pada Tabel 1 diketahui bahwa beberapa fauna yang dikategorikan endemik, dilindungi dan hampir punah adalah beberapa spesies burung kakatua kecil jambul kuning (*Cacatua sulphurea*), koakiau (*Philemon buceroides*), burung madu (*Lichmera lombokia*), beo sumbawa (*Gracula religiosa*), Elang Tikus (*Elanus caeruleus*), Uncal Biau (*Macropygia emiliana*), Walik Putih (*Ptilinopus cinctus*), dan burung Anis Nusa Tenggara (*Zoothera dohertyi Paradoxurus*). Demikian pula beberapa spesies kupu-kupu, seperti *Troides Helena*, *Papilio helenus*, *Papilio memnon*, *Graphium sarpedon*, *Moduza prochris* banyak ditemukan di NTB dan merupakan spesies dilindungi seperti halnya trenggiling (*Manis javanica*) yang dikategorikan spesies terancam punah.

IUCN (*International Union for Conservation of Nature*) yaitu Uni Internasional untuk Konservasi Alam adalah sebuah organisasi internasional yang didedikasikan untuk konservasi sumber daya alam. IUN mencatat spesies terancam punah yang ada di NTB, karena spesies tersebut merupakan spesies yang beresiko tinggi akan punah di alam liar untuk masa yang akan datang, diantaranya adalah banteng, rusa timor (*Cervus timorensis*), monyet, musang rinjani (*hemaproditus rinjanicus*), landak (*Hystrix javanica*), trenggiling (*Manis javanica*), serta beberapa spesies burung seperti burung udang, burung pecuk ular, dll. Selain itu NTB juga diketahui juga sebagai area transit sekawanan penyu. Beberapa satwa yang disebutkan tersebut tercatat dalam PP No 7 Tahun 1999 sebagai satwa yang dilindungi diantaranya karena rawan untuk diawetkan.

Seperti diketahui, kekayaan hayati Indonesia untuk satwa terestrial terkini dari tahun 2014 tercatat sebanyak 720 spesies tergolong mamalia, 1599 spesies burung, 385 spesies amfibi, 723 spesies reptil, dan terdapat juga spesies serangga maupun invertebrata, bahkan spesies yang baru ditemukan. Selain itu Indonesia juga mencatat data spesies hampir punah, meliputi 147 spesies mamalia, 114 spesies burung, masing-masing 28 spesies reptil dan 28 spesies invertebrata. Banyaknya kasus kematian satwa terancam punah menunjukkan bahwa terdapat kerentanan spesies.

### KESIMPULAN

Kawasan hutan konservasi dan lindung sebagai habitat fauna mempunyai kekayaan spesies yang lebih tinggi dibandingkan hutan produksi. Kondisi alih fungsi hutan memberikan kontribusi terhadap timbulnya permasalahan kerusakan habitat fauna yang sulit untuk direkoveri sehingga disarankan untuk menghindari kawasan tersebut khususnya untuk pembangunan infrastruktur yang mempunyai potensi merusak habitat flora dan fauna.

Data fauna khas, langka, dan terancam punah yang dapat digunakan sebagai *data base* untuk rona awal NTB meliputi fauna kelompok mamalia, reptil, unggas (burung dan angsa), amphibi, serta berbagai spesies kupu-kupu. Rusa timor, musang rinjani dan

beberapa spesies kupu-kupu merupakan spesies endemik, trenggiling spesies terancam punah sehingga spesies-spesies tersebut dilindungi untuk manajemen keberlanjutan ekosistem di NTB. Data yang diperoleh diharapkan dapat digunakan sebagai *data base* awal rona dari daerah NTB. Beberapa kawasan konservasi serta lindung dengan keberadaan spesies-spesies tersebut perlu dipertimbangkan, seperti Sembalun Kabupaten Lombok Timur, Bima, Pulau Mojo Kabupaten Sumbawa, Pulau Satonda Kabupaten Dompu, Bangkombangko, Pelangan, Kerandangan, Suranadi Lombok Barat, Pujut Lombok Tengah, Pedauh, Jereweh, Sumbawa Barat terkait dengan rencana penetapan tapak PLTN, hal inipun sesuai rekomendasi dari IAEA.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih disampaikan kepada Kepala Bidang Radioekologi yang telah memberikan sarana dan prasarana dalam penyelesaian laporan ini.

#### DAFTAR PUSTAKA

1. BAIQ LIANA WIDIDYANTI. "Analisis potensi energi laut di pantai Ampenan Kota Mataram, Provinsi NTB", Prosiding Seminar Nasional ReTII ke 10, Tahun 2015. ISSN 1907-5995. Hal. 805-811(2015).
2. RUDY SUSANTO, IWAN VANANY, CHRISTIONO UTOMO. "Studi Kelayakan Finansial Dengan Mempertimbangkan Kelangsungan Bahan Baku Khususnya Sekam Padi Pada Pengembangan Proyek Biomass Power Plant (Studi Kasus Di Lombok-NTB)". Prosiding Seminar Nasional Manajemen Teknologi XXI Program Studi MMT-ITS, Surabaya 19 Juli 2014. ISBN: 978-602-70604-0-1. Hal. 1-7 (2014).
3. ZURIAS ILYAS. "Pemanfaatan Energi Geothermal Dan Dampak Perubahan Iklim". Prosiding Seminar Nasional VIII SDM, Teknologi Nuklir Yogyakarta, 31 Oktober 2012. ISSN 1978-0176. Hal. 222-229(2012).
4. ARINI WRESTA, HENNY SUDIBYO. "Potensi Energi Listrik Yang Dapat Dihasilkan Dari Digester Biogas Berbahan Baku Kotoran Sapi Di Berbagai Daerah Di Indonesia". Prosiding Seminar Nasional. Rekayasa energi, Mekatronik, dan teknologi Kendaraan, RIMTEK 2013. Kampus LIPI Bandung, 18 September 2013. ISBN 978-602-17952-0-0. Hal.93-100(2013).
5. DPR RI (Fraksi NASDEM)-BATAN. Segera Lakukan Studi Kelayakan Lokasi PLTN di NTB. <https://www.fraksinasdem.org/2017/10/19/batan-segera-lakukan-studi-kelayakan-lokasi-pltn-di-ntb>. Diakses Juli 2018
6. DUNIA ENERGI. Studi Kelayakan Awal PLTN NTB dan Kaltim Ditargetkan Tuntas Tahun Ini. <http://www.dunia-energi.com/studi-kelayakan-awal-pltn-ntb-dan-kaltim-ditargetkan-tuntas-tahun-ini/>. Diakses Juli 2018
7. AWALUDIN. NTB-BATAN sepakat lakukan penelitian PLTN. <https://mataram.antaraneews.com/berita/36038/ntb-batan-sepakat-lakukan-penelitian-pltn>. Antara News, Jumat, 23 Februari 2018. Diakses Juli 2018.
8. \_\_\_\_\_, "Perlindungan Dan Pengelolaan Lingkungan Hidup", UU No. 32 Tahun 2009. Jakarta 2009.
9. DINAS LINGKUNGAN HIDUP DAN KEHUTANAN PROVINSI NUSA TENGGARA BARAT. "Statistik Dinas Lingkungan Hidup Dan Kehutanan Tahun 2016". Dinas Lingkungan Hidup Dan Kehutanan Provinsi Nusa Tenggara Barat. 2017.
10. \_\_\_\_\_, "Kehutanan", Undang Undang Republik Indonesia No.41, Tahun 1999, Jakarta.1999.
11. \_\_\_\_\_, "Konservasi Sumber Daya Alam Hayati Dan Ekosistemnya", Undang Undang No. 5 Tahun 1990, Jakarta 1990.
12. \_\_\_\_\_, "Kawasan Suaka Alam Dan Kawasan Pelestarian Alam". Peraturan Pemerintah No. 68 Tahun 1998. Jakarta, 1998.
13. ATSUKI HIYAMA, CHIYO NOHARA, WATARU TAIRA, SEIRA KINJO, MASAKI IWATA, JOJI M OTAKI. The Fukushima nuclear accident and the pale grass blue butterfly: evaluating biological effects of long-term low-dose exposures. *BMC Evolutionary Biology*. ISSN: 1471-2148. Vol 13(2013)168
14. BEKIR KABASAKAL, TAMER ALBAYRAK. Effects of NPP accidents on Biodiversity and Awareness of Potential Nuclear Accident Risk Near The Eastern Border of Turkey. *Fresenius Environmental Bulletin*. October 2012. Vol.21(11b)3434-3436
15. BPS. Provinsi NTB dalam Angka 2016. Badan Pusat Statistik. Jakarta, 2016.

16. KEMENTERIAN LINGKUNGAN HIDUP DAN KEHUTANAN. Balai Konservasi SDA NTB. Kawasan Cagar alam, Konservasi, Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. Balai KSDA. 2017.
17. HANNAH TIMMINS. Opsi Legal Perlindungan Hutan Pada Lahan Zona Pertanian di Indonesia. November 2007. <http://www.tft-earth.org/wp-content/uploads/2018/01/OPSI-LEGAL-PERLINDUNGAN-HUTAN-IN-INDONESIA-PADA-LAHAN-ZONA.pdf>. Diakses Agustus 2018.
18. JUNE MELLAWATI, YARIANTO SBS, HADI SANTOKO. "Sumber Potensial Bahaya Eksternal Akibat Kegiatan Manusia pada Survey Tapak PLTN". Jurnal Pengembangan Energi Nuklir Vol. 12 No. 1, Juni 2010. Hal. 28-37(2010).
19. MANOJ KUMAR JHARIYA, ABHISHEK RAJ. "Effects of wildfires on flora, fauna and physico-chemical properties of soil-An Overview". Journal of Applied and Natural Science. Volume 6:(2)887-897(2014).
20. BEKIR KABASAKAL, TAMER ALBAYRAK. "Effects of Nuclear Power Plant accidents on biodiversity and awareness of potential nuclear accident risk near the eastern border of Turkey". October 2012. Fresenius Environmental Bulletin 21(11b)3434-3436(2012)
21. TRIMANTO, SIAHAAN F.A, "Botanical Survey in Moyo Island, West Nusa Tenggara, Indonesia: Inventory of Flora Collection at Forest". The Journal of Tropical Life Science. April 2017, 7(2): pp.158–166(2017).
22. WILIAM M ROMBANG, COLIN TRAINOR, DWI LESMANA. "Daerah Penting Bagi Burung Nusatenggara. Perlindungan Hutan dan Konservasi Alam", Birdlife Indonesia. SMK Grafika Desa Putera. Bogor. ISBN 979-95794-8-1, Tahun 2002
23. GITO HADIPRAYITNO, I GDE MERTHA, MOH. LIWA ILHAMDI. "Species Richness and Birds Conservation Priority in Mount Rinjani Areas, Lombok". Biosaintifika: Journal of Biology and Biology Education, 8(3)270-277(2016).

#### **DISKUSI/TANYA JAWAB**

##### **1. PERTANYAAN :**

Apa yang dapat dilakukan untuk mengurangi fauna khas, endemik, hampir punah tersebut hilang atau habitatnya punah beserta hewannya?

##### **JAWABAN :**

Langkah-langkah Pemerintah/Tim Lingkungan

- Pelestarian InSitu (pelestarian dilakukan pada tempat aslinya hewan/satwa tersebut berada. Misal: Suaka Margasatwa, Hutan Lindung, Taman Nasional)
- Pelestarian ExSitu (pelestarian yang dilakukan di luar tempat tinggal aslinya fauna/satwa. Biasanya upaya rehabilitasi, penangkaran, dan pembiakan. Misal: Kebun Botani (Taman Safari, kebun binatang, penangkaran)

Selain pelestarian InSitu dan ExSitu, disarankan:

- Tidak berburu (larangan berburu)
- Melindungi hewan langka
- Budidaya hewan langka

## PEMBANDINGAN LAJU EROSI/DEPOSISI TANAH MENGGUNAKAN MODEL KONVERSI PM DAN MBM1 DI SUB-DAS CIBERANG – LEBAK - BANTEN

Nita Suhartini<sup>1</sup> dan Barokah Aliyanta<sup>1</sup>

<sup>1</sup>) Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi – BATAN

Jl.. Cinere Pasar Jumat Kotak Pos 7002 JKSKL, Jakarta 12070, Indonesia

e-mail : [s-nita@batan.go.id](mailto:s-nita@batan.go.id)

### ABSTRAK

**PEMBANDINGAN LAJU EROSI/DEPOSISI TANAH MENGGUNAKAN MODEL KONVERSI PM DAN MBM 1 DI Sub-DAS CIBERANG – LEBAK - BANTEN.** Sungai Ciujung memiliki daerah tangkapan air yang sangat besar, dan karena perubahan fungsi hutan di daerah hulu menyebabkan sungai ini mengalami pendangkalan karena terjadinya erosi. Sub Daerah Aliran Sungai (sub-DAS) Ciberang merupakan bagian dari hulu DAS Ciujung yang dialiri oleh dua sungai besar yaitu S. Ciberang dan S.Cisemeut. Radiogenik <sup>137</sup>Cs yang terdapat di tanah dapat digunakan sebagai perunut untuk mengestimasi besarnya laju erosi/deposisi di suatu lahan tertentu yang telah terjadi sejak tahun 1950-an, dengan membandingkan nilai aktivitas total <sup>137</sup>Cs di suatu lokasi penelitian dengan suatu lokasi pembanding. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan distribusi laju erosi/deposisi suatu lahan olahan/tak diolah. Lokasi penelitian adalah lahan olahan/tak diolah di sub-DAS Ciberang – Lebak - BANTEN. Pengambilan cuplikan dilakukan menggunakan alat *scraper* (20 x 50) cm untuk distribusi vertikal radiisotop <sup>137</sup>Cs di lokasi pembanding dan *coring* ( $d_i = 7$  cm) untuk estimasi laju erosi/deposisi. Empat belas lokasi dipilih untuk pengambilan cuplikan yang dilakukan secara transek dengan jumlah titik percobaan setiap transek berkisar antara 2 sampai dengan 8 titik. Perhitungan laju erosi/deposisi menggunakan dua model konversi yaitu Model Proporsional (PM) dan Model Kesetimbangan Massa 1 (MBM 1). Hasil penelitian menunjukkan bahwa perbedaan distribusi laju erosi/deposisi titik-titik percobaan menggunakan dua model tersebut tidak signifikan dan berkisar antara -16,4 t/ha.thn sampai dengan 60,2 t/ha.thn., dan -32,7 t/ha.thn sampai dengan 63,6 t/ha.thn masing-masing untuk PM dan MBM 1.

Kata kunci : Sedimentasi, laju erosi/deposisi, radioisotop alam, <sup>137</sup>Cs, DAS Ciujung

### ABSTRACT

**COMPARISON OF EROSION/DEPOSITION RATE USING PM AND MBM 1 MODEL CONVERSION ON THE SubCATCHMENT AREA OF CIBERANG – LEBAK - BANTEN.** Ciujung river has a wide catchment area, and because of deforestation at upstream causes sedimentation and flood. SubCatchment of Ciberang is a part of Ciujung Catchment that located at the upstream and is flows by two main rivers namely Ciberang River and Cisemeut River. <sup>137</sup>Cs radiogenic content in the soil can be used to estimate the rate of erosion/deposition in an area occurring since 1950's, by comparing the content of the <sup>137</sup>Cs in observed site with those in a stable reference site. The study is to investigate distribution of erosion/deposition rate on cultivation area. The study site located at Ciberang subCatchment area – Lebak – BANTEN. Sampling of soil was done by using scraper (20 x 50) cm for vertical distribution of <sup>137</sup>Cs at reference site, and coring ( $d_i = 7$  cm) for distribution of erosion/deposition rate. Fourteen locations had been chosen for transect sampling and 2 to 8 sampling points were selected for each transect. Estimation of erosion/deposition rate using two models conversion namely Proportional Model (PM) dan Mass Balance Model 1 (MBM 1). The result showed that the differences erosion/deposition rate between two models were insignificant and range from -16,4 t/ha.y to 60,2 t/ha.y., and -32,7 t/ha.y to 63,6 t/ha.y for PM dan MBM 1 respectively.

Keywords : sedimentation, erosion/deposition, environmental radioisotope, <sup>137</sup>Cs, Ciujung catchment

## PENDAHULUAN

Daerah Aliran Sungai (DAS) Ciujung terletak di wilayah Serang – BANTEN dan pada musim penghujan sungai Ciujung sering mengalami peluapan sehingga mengakibatkan banjir untuk wilayah yang luas, disebabkan karena adanya pembukaan hutan secara besar-besaran di daerah hulu. Hulu DAS Ciujung ini dibagi menjadi dua sub-DAS yaitu sub-DAS Ciujung hulu dan sub-DAS Ciberang dimana masing-masing dialiri oleh sungai besar yaitu Sungai Ciujung hulu dan Sungai Ciberang. Erosi merupakan masalah yang penting di DAS Ciujung ini, karena dapat mengakibatkan terjadinya pendangkalan di aliran sungai atau bendungan yang berfungsi menampung air sungai dan hujan. Keketukan air yang disebabkan oleh hasil erosi tanah, pada suatu sungai dapat digunakan sebagai indikator tentang kondisi erosi secara kualitatif pada suatu DAS. Besarnya erosi dapat ditentukan secara konvensional yaitu dengan cara melihat seluruh kondisi lapangan dan membawa sampel tanah untuk dianalisis beberapa unsur hara dan organiknya (N, P, C organik), tetapi metode ini membutuhkan waktu yang lama [1]. Karena adanya keterbatasan pada metode konvensional dalam mendokumentasikan distribusi erosi, maka metode teknik nuklir mulai banyak digunakan. Melalui penelitian ini akan dilakukan pendekatan terjadinya pendangkalan tersebut dengan mempelajari distribusi laju erosi/deposisi di daerah lahan olahan/tak diolah disekitar DAS tersebut menggunakan metode isotop alam  $^{137}\text{Cs}$ .

$^{137}\text{Cs}$  adalah radioisotop buatan manusia dengan waktu paruh 30,2 tahun. Keberadaan radioisotop  $^{137}\text{Cs}$  di alam ini adalah merupakan jatuhnya (*fallout*) dari atmosfer sebagai hasil percobaan senjata nuklir.  $^{137}\text{Cs}$  secara global telah dapat dideteksi di alam ini sejak 1954, dan fluks yang tertinggi pada belahan bumi bagian utara terjadi pada tahun 1963, sehubungan dengan adanya percobaan senjata nuklir secara besar-besaran yang terjadi pada saat itu. Jatuhan (*fallout*)  $^{137}\text{Cs}$  dari atmosfer berkurang drastis setelah adanya perjanjian percobaan senjata nuklir pada tahun 1963, dan sejak tahun 1970-an jatuhan  $^{137}\text{Cs}$  dari atmosfer menjadi sangat tidak signifikan (hampir tidak ada). Selain dari percobaan senjata nuklir, untuk beberapa wilayah di Eropa dan wilayah yang berada berdekatan dengan Rusia, mengalami penambahan jatuhan  $^{137}\text{Cs}$  yang berasal dari peristiwa kecelakaan Chernobyl pada tahun 1986 [2,3]. Jatuhan (*fallout*)  $^{137}\text{Cs}$  ketika menyentuh permukaan bumi akan teradsorpsi secara cepat dan kuat pada permukaan tanah dan kemudian terdistribusi secara vertikal dan lateral bersama-sama dengan pergerakan partikel tanah, kuatnya ikatan  $^{137}\text{Cs}$  pada partikel tanah membuat  $^{137}\text{Cs}$  dapat digunakan sebagai perunut (*tracer*) pada pergerakan tanah dan sedimen [4].

Pengukuran menggunakan  $^{137}\text{Cs}$  dalam penelitian erosi tanah dan asal usul sedimen telah semakin menarik perhatian dan banyak digunakan saat ini. Metode radioisotop alam ini memiliki beberapa kelebihan dibandingkan dengan metode konvensional diantaranya metode radioisotop alam  $^{137}\text{Cs}$  ini dapat digunakan untuk memperkirakan laju erosi yang telah terjadi selama kurun waktu 40 tahun (*medium term*) dan dengan sekali pengambilan sampel ke lokasi penelitian hasil analisis dapat digunakan untuk menentukan pola distribusi laju erosi/deposisi titik-titik percobaan pada suatu lahan yang luas. Penggunaan radioisotop alam  $^{137}\text{Cs}$  untuk memperkirakan laju erosi/deposisi yaitu dengan membandingkan nilai inventori  $^{137}\text{Cs}$  titik percobaan terhadap nilai inventori  $^{137}\text{Cs}$  dari lokasi pembandingan (*reference site*). Jika nilai inventori  $^{137}\text{Cs}$  dari titik percobaan lebih kecil dari nilai inventori  $^{137}\text{Cs}$  lokasi pembandingan mengindikasikan telah terjadi proses erosi, dan jika nilai inventori  $^{137}\text{Cs}$  titik percobaan lebih besar dari nilai inventori lokasi pembandingan mengindikasikan telah terjadi proses deposisi. [5,6]. Lokasi penelitian yang dipilih adalah Sub-DAS Ciberang – Lebak – BANTEN dimana sub-DAS Ciberang ini dilalui oleh dua sungai utama yaitu S.Ciberang dan S.Cisemeut. **Tujuan** penelitian adalah menentukan distribusi laju erosi/deposisi dan pengaruh tanaman penutup serta tekstur tanah untuk setiap unit lahan di subDAS Ciberang – Lebak – BANTEN menggunakan radioisotop  $^{137}\text{Cs}$  dengan dua model konversi yaitu PM dan MBM 1.

## METODE

### a. Pengambilan cuplikan

Lokasi pengambilan cuplikan terdiri dari lokasi pembandingan (RS), dan 14 lokasi untuk studi distribusi laju erosi/deposisi (Gambar 1). Lokasi Pembandingan merupakan hutan primier yang terletak di hulu sub-DAS Ciberang di kecamatan Muncang, dan lokasi penelitian terdiri dari lahan olahan dan lahan tak diolah (kebun campuran, perkebunan karet dan kelapa sawit).

### Lokasi Pemanding (*reference site*)

Pengambilan cuplikan di lokasi pemanding menggunakan alat *scraper* dengan ukuran (20x50) cm hingga kedalaman 20 cm dengan interval setiap lapisan 2 cm, kemudian dilanjutkan menggunakan *coring* ( $d_i = 7$  cm) hingga kedalam 30 cm dengan interval lapisan 10 cm.

### Lokasi penelitian

Lokasi penelitian ini merupakan suatu daerah perbukitan yang digunakan sebagai lahan pertanian tumpang sari, kebun campuran dan perkebunan. Pengambilan cuplikan dilakukan secara garis lurus dari atas ke bawah (transek), dan setiap transek terdiri dari beberapa titik percobaan dengan jarak antara titik untuk setiap transek antara 10 m hingga 25 m. Jarak antara lahan berkisar 5 km hingga 10 km. Pada titik-titik percobaan, pengambilan cuplikan menggunakan *coring* ( $d_i = 7$  cm) hingga kedalaman 20 cm.



Gambar1. Peta lokasi penelitian dan titik-titik pengambilan sampel

### b. Perlakuan Pendahuluan cuplikan

Cuplikan tanah dibawa ke laboratorium sedimentologi – PAIR – BATAN, kemudian dilakukan perlakuan pendahuluan sebelum kandungan  $^{137}\text{Cs}$  nya dianalisis. Perlakuan pendahuluan cuplikan terdiri dari : pengeringan cuplikan tanah, penimbangan berat kering total cuplikan, pengayakan hingga lolos ayakan 1 mm dan penggerusan untuk sampel yang tidak lolos ayakan 1 mm.

### c. Analisis kandungan $^{137}\text{Cs}$

Sebanyak 400 g dari cuplikan tanah kering dan halus dimasukkan ke dalam merinelli dan ditutup dengan baik. Kandungan  $^{137}\text{Cs}$  dalam cuplikan tanah selanjutnya dianalisis menggunakan detektor *High Purity Germanium* (HPGe) dengan efisiensi 30 % yang dihubungkan ke GENIE 2000 *spectrum master* dan *multi channel analyzer* (MCA). Pengukuran dilakukan selama minimum 24 jam pada energi 661,66 keV. Setelah

pencacahan, cuplikan tanah dikembalikan ke kantong plastik dan disimpan, sehingga dapat digunakan kembali jika diperlukan.

#### d. Perhitungan laju erosi

Perhitungan laju erosi/deposit untuk setiap titik percobaan menggunakan dua model konversi yaitu PM dan MBM 1 yang terdapat dalam software model konversi  $^{137}\text{Cs}$  yang dikembangkan di Universitas EXETER- United Kingdom [7], yaitu :

##### 1. Model Proporsional (MP) :

$$Y = 10 \frac{B \cdot d \cdot X}{100 T P} \quad (1)$$

dimana :

- Y = Laju erosi/deposit (t/ha/thn)
- d = kedalaman lapisan pengolahan (m)
- B = densitas bulk ( $\text{kg/m}^3$ )
- X = persentase kehilangan total inventori  $^{137}\text{Cs}$  (didefinisikan sebagai
  - $(A_{\text{ref}} - A)/A_{\text{ref}} \times 100$ ) untuk  $A < A_{\text{ref}}$ , dan
  - $(A - A_{\text{ref}})/A_{\text{ref}} \times 100$ ) untuk  $A > A_{\text{ref}}$  )
- $A_{\text{ref}}$  = total inventori  $^{137}\text{Cs}$  di lokasi pembandingan ( $\text{Bq/m}^2$ )
- A = total inventori  $^{137}\text{Cs}$  titik percobaan ( $\text{Bq/m}^2$ )
- P = Faktor ukuran partikel ( $P \geq 1.0$ )
- T = selang waktu antara awal terjadinya akumulasi  $^{137}\text{Cs}$  pada permukaan tanah sampai dengan waktu *sampling* (thn)

##### 2. Model Keseimbangan Massa 1 (MBM 1).

Model Keseimbangan Massa 1 bertujuan untuk mengatasi keterbatasan dari Model Proporsional dengan memperhitungkan baik masukan (*input*) maupun kehilangan (*losses*) dari  $^{137}\text{Cs}$  dari profil tanah sejak terjadinya jatuhnya (*fallout*)  $^{137}\text{Cs}$  pada permukaan bumi. Zhang et al (8) telah memperkenalkan Model Keseimbangan Massa sederhana yang mengasumsikan bahwa maksimum jatuhnya  $^{137}\text{Cs}$  terjadi pada tahun 1963, seperti yang terlihat pada persamaan berikut :

$$Y = 10 d B (1 - (1 - X/100)^{1/(t-1963)}) \quad (2)$$

Dimana :

- Y = laju erosi pertahun (t/ha/yr)
- d = kedalaman lapisan pengolahan tanah (m)
- B = densitas bulk ( $\text{kg/m}^3$ )
- X = persentase kehilangan total inventori  $^{137}\text{Cs}$  (didefinisikan sebagai
  - $(A_{\text{ref}} - A)/A_{\text{ref}} \times 100$ ) untuk  $A < A_{\text{ref}}$ , dan
  - $(A - A_{\text{ref}})/A_{\text{ref}} \times 100$ ) untuk  $A > A_{\text{ref}}$  )
- $A_{\text{ref}}$  = total inventori  $^{137}\text{Cs}$  di lokasi pembandingan ( $\text{Bq/m}^2$ )
- A = total inventori  $^{137}\text{Cs}$  titik percobaan ( $\text{Bq/m}^2$ )
- P = Faktor ukuran partikel ( $P \geq 1.0$ )
- T = selang waktu antara awal terjadinya akumulasi  $^{137}\text{Cs}$  pada permukaan tanah sampai dengan waktu *sampling* (thn)

## HASIL dan PEMBAHASAN

### a. Lokasi Pembandingan

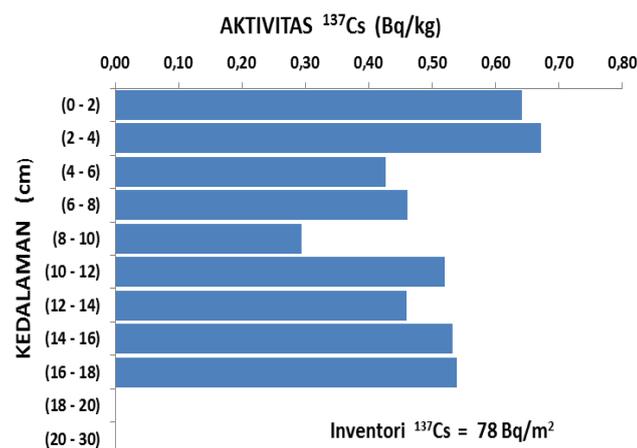
Lokasi pembandingan yang dipilih adalah hutan lindung yang terletak di kecamatan Muncang pada posisi (S =  $06^{\circ} 36' 11,8''$ , T =  $106^{\circ} 18' 43,0''$ ). Pengambilan cuplikan di lokasi

pembandingan dilakukan sebanyak 1 titik menggunakan alat *scraper* untuk profil distribusi vertikal dan 7 titik menggunakan alat *coring* untuk nilai inventori. Nilai aktivitas  $^{137}\text{Cs}$  (Bq/kg) dan inventori (Bq/m<sup>2</sup>) dari lokasi pembandingan dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Aktivitas (Bq/kg) dan Inventori (Bq/m<sup>2</sup>)  $^{137}\text{Cs}$  di lokasi Pembandingan Hutan primer Kecamatan Muncang – Lebak BANTEN

No.	Profil distribusi		INVENTORI	
	Kedalaman (cm)	Bq/kg	KODE	Bq./m <sup>2</sup>
1.	(0 – 2)	0,64	Scraper (0-20)cm	63,45
2.	(2 – 4)	0,67	COR 1	58,67
3.	(4 – 6)	0,43	COR 2	83,05
4.	(6 – 8)	0,46	COR 3	88,72
5.	(8 – 10)	0,29	COR 4	83,39
6.	(10 – 12)	0,52	COR 5	83,76
7.	(12 – 14)	0,46	COR 6	65,49
8.	(14 – 16)	0,53	COR 7	95,45
9.	(16 - 18)	0,54		
10.	(18 – 20)	0,00	RERATA	78 ± 12
11.	(20 – 30)	0,00		

Profil distribusi vertikal untuk lokasi pembandingan dapat dilihat pada Gambar 2. Pada Gambar 2, konsentrasi  $^{137}\text{Cs}$  menggunakan satuan (Bq/kg) karena tidak semua lapisan memiliki ketebalan 2 cm dimana pada kedalaman 20 cm hingga 30 cm interval ketebalan lapisan tanah adalah 10 cm. Melalui gambar 2 dapat dilihat bahwa lokasi pembandingan ini memiliki konsentrasi maksimum pada kedalaman terletak pada kedalaman (0 – 2) dan (2 – 4) cm.



Gambar 2. Profil distribusi vertikal  $^{137}\text{Cs}$  di lapisan tanah dari lokasi pembandingan

Pola distribusi yang ideal untuk lokasi pembandingan dimana proses erosi/deposisi tidak/sangat kecil terjadi adalah konsentrasi maksimum terdapat pada lapisan permukaan dan menurun secara eksponensial dengan bertambahnya kedalaman [9]. Profil distribusi  $^{137}\text{Cs}$  pada Gambar 2, tidak mengikuti pola distribusi secara teoritis, hal ini kemungkinan

disebabkan pernah terjadi peremajaan tanaman di hutan lindung ini setelah tahun 1950-an sehingga terjadi pencampuran lapisan tanah. Selain itu tanaman di hutan lindung ini memiliki akar yang panjang sehingga dapat mempengaruhi proses distribusi vertikal dari isotop alam  $^{137}\text{Cs}$ . Nilai inventori rata-rata dari 1 scrapper dan 7 coring dengan kedalaman yang sama adalah  $(78 \pm 13) \text{ Bq/m}^2$ .

#### b. Studi distribusi erosi/distribusi

Pengambilan cuplikan untuk titik-titik percobaan distribusi erosi/deposisi dilakukan menggunakan alat *coring* dengan kedalaman 20 cm. Pengambilan sampel secara transek dari atas kebawah, jumlah titik percobaan setiap transek berkisar antara 2 hingga 8 titik. Jumlah titik pengambilan sampel setiap transek berdasarkan kepada panjangnya slope dari setiap lokasi penelitian, dan jarak antara titik berkisar dari 15 m sampei 25 m. Lokasi penelitian berupa lahan yang diolah (ditanami tanaman semusin) dan lahan yang tak diolah (kebun campuran dan perkebunan). Nilai-nilai aktivitas dan inventori  $^{137}\text{Cs}$  untuk setiap titik percobaan dapat dilihat pada Tabel 2. Melalui Tabel 2 dapat dilihat bahwa sebagian besar nilai inventori dari titik-titik percobaan lebih besar dari lokasi pembandingan, ini menunjukkan bahwa proses erosi tidak terjadi di lokasi – lokasi tersebut.

Tabel 2 . Nilai aktivitas (Bq/kg) dan inventori (Bq/m<sup>2</sup>)  $^{137}\text{Cs}$  dari titik-titik percobaan

No.	KODE / L O K A S I	P O S I S I		Aktivitas $^{137}\text{Cs}$	
		S	T	(Bq/kg)	(Bq/m <sup>2</sup> )
1.	AF 1 /Ds.Pangrudin  (Agroforestri)	06° 36' 11,8"	106°18' 43,0"	1,06	168,58
				0,96	160,27
				1,26	198,25
				1,43	291,97
				1,04	143,73
				1,04	144,22
2.	TO 2 /Ds. Pangrudin (Tanaman selalu ditebang habis)	06° 29' 26,8"	106°27' 28,9"	1,00	124,17
				1,16	144,62
				1,09	146,28
3.	MHN 3 / Ds. Halur Gajlug (Kebun Campuran/ Akasia dan tanaman keras lainnya)	06° 31' 10,9"	106°22' 51"	1,69	271,80
				0,38	68,99
				1,18	198,84
4.	KJB 4 / Ds. Sajira (kebun campuran/ Aksia, jinjing dan phn krs lainnya)	06° 30' 22,2"	106°22' 21"	0,43	62,04
				2,16	345,61
5.	KK 5 / Ds. Cimarga (Perkebunan karet yang di remajakan)	06° 25' 12,6"	106°13'54,9"	1,07	247,51
				0,75	164,04
				0,55	125,99
6.	KS 6 / Ds. Leuwi Damar (Perkebunan Kelapa sawit)	06° 31' 06,5"	106°12'30,2"	0,57	97,28
				0,76	152,59
				0,24	70,10
7.	KBS 7 / Ds. Jalupang Mulya (kebun singkong/singkong dan tnmn semusin lainnya)	06° 31' 54,4"	106°13'28,6"	1,08	149,96
				0,52	76,48
				0,92	141,66
8.	KBS 8 / Kec. Curug Bitung Kebun singkong dengan slope yang panjang)	06° 29' 05,0"	106°22'01,0"	1,04	159,17
				0,74	101,09
				0,67	90,33
				1,39	186,00
				1,61	246,69
9.	JBN 9 / Ds. Banjar Sari (Kebun campuran/ Jabon,pisang dll)	06° 34' 55,7"	106°24'28,4"	1,46	276,21
				0,70	141,56
				1,70	326,20
10.	BM 10 / Ds. Bungur Mekar (Perkebunan Karet)	06° 26' 47,3"	106°19'03,8"	0,76	126,18
				0,76	108,89
				0,73	102,52
				0,67	102,97
11.	SJR 11 / Ds. Sajira	06° 29' 49,2"	106°20'47,3"	0,37	50,42

	(Kebun Akasia/serasah)			0,00	0,00
12.	CMN 12 / Kec. Ciminyak (Kebun campuran)	06° 32' 08,3"	106°19'13,6"	0,79 0,62	107,76 96,49
13.	CMG 13 / Kec. Leuwidamar (Kebun segon)	06° 32' 13,9"	106°18'21,3"	0,75 1,00	103,50 162,54
14.	MCG 14 / Kec. Muncang (Kebun Mahoni)	06° 32' 57,2"	106°16'03,1"	0,51 1,17 0,88	86,11 181,01 131,95

Dengan menggunakan persamaan (1) dan (2) maka diperoleh laju erosi/deposisi dari setiap lokasi penelitian, seperti yang terlihat pada Tabel 3. Lokasi penelitian di sub-DAS Ciberang ini pada umumnya merupakan kebun campuran yang ditanami oleh tanaman keras seperti segon, mahoni serasah, jengkol, pete, manggis, jati ambon dan beberapa tanaman keras lainnya. Selain itu ada beberapa perkebunan yang luas yaitu perkebunan karet dan kelapa sawit. Lahan olahan berupa kebun singkong yang sangat luas dan ada juga yang tidak terlalu luas. Kebun campuran dan pekebunan tersebut selain ditanami oleh tanaman keras juga ditumbuhi oleh ilalang atau rumput yang dapat menahan terjadinya proses erosi ketika terjadi hujan lebat. Secara umum lokasi penelitian memiliki tataguna lahan yang baik karena tanaman-tanaman keras yang ditanam pada kebun-kebun campuran dan perkebunan-perkebunan tersebut dapat mencegah terjadinya erosi. Untuk lokasi SJR 11 terjadi proses erosi, hal ini disebabkan karena lokasi ini merupakan perkebunan karet yang telah mengalami peremajaan, lokasi ini ditanami oleh pohon karet dan rumput sehingga permukaan tanahnya tertutup oleh rumput. Erosi yang terjadi di lokasi ini disebabkan karena ketika terjadi proses peremajaan tanaman karet banyak nutiran tanah yang terbawa oleh tanaman karet tua sehingga dapat mengurangi kandungan isotop alam  $^{137}\text{Cs}$  yang terdapat di lokasi tersebut. Keruhnya air Sungai Ciberang dan pendangkalan yang terjadi di sungai ini, karena di wilayah DAS Ciujung banyak terjadi penambangan pasir, dimana banyak sekali bukit-bukit yang subur dipangkas untuk diambil pasir dan betuan gunungnya. Hasil dari proses pencucian pasir menyebabkan air sungai Ciberang menjadi keruh dan terjadi proses pendangkalan, sehingga pada musim penghujan sering terjadi banjir besar.

Tabel 3. Laju erosi/deposisi dari lokasi-lokasi penelitian menggunakan model Konversi PM dan MBM 1

No	KODE	P O S I S I		Laju Erosi (t/ha.thn)		Slope (°)	KETERANGAN
		S	T	PM	MBM 1		
1.	AF 1	06° 36' 11,8"	106°18' 43,0"	32,5	34,20	(15 - 20)	Agroforestry (Akasia, rumput)
2.	TO 2	06° 29' 26,8"	106°27' 28,9"	13,6	14,4	(5 - 15)	Akasia (tembang habis)
3.	MHN 3	06° 31' 10,9"	106°22' 51"	31,4	33,2	20	Akasia, serasah daun, dll
4.	KJB 4	06° 30' 22,2"	106°22' 21"	30,6	32,2	(45-60)	Jinjing, akasia, rumput
5.	KK 5 /	06° 25' 12,6"	106°13'54,9"	36,4	38,5	30	Lahan kosong bekas tnmn karet
6.	KS 6	06° 31' 06,5"	106°12'30,2"	13,4	14,1	30	Kelapa sawit, rumput
7.	KBS 7	06° 31' 54,4"	106°13'28,6"	11,4	12,0	25	Kebun olahan, manii, sengkong
8.	KBS 8	06° 29' 05,0"	106°22'01,0"	24,8	26,2	(5 - 10)	Tanah olahan, singkong
9.	JBN 9	06° 34' 55,7"	106°24'28,4"	60,2	63,6	30	Jati ambon, pisang, rumput
10.	BM 10	06° 26' 47,3"	106°19'03,8"	8,9	9,4	(20-40)	Serasah, rumput Ilalang
11.	SJR11	06° 29' 49,2"	106°20'47,3"	-16,4	-32,7	30	Kebun karet, rumput, serasah
12.	CMN 12	06° 32' 08,3"	106°19'13,6"	4,9	5,2	45	Segon, rumput
13.	CMG 13	06° 32' 13,9"	106°18'21,3"	12,4	13,1	40	Segon, rumput
14.	MCG 14	06° 32' 57,2"	106°16'03,1"	15,3	16,1	45	Mahoni, serasah, rumput

Hasil perhitungan laju erosi/deposisi menggunakan model konversi PM dan MBM 1 seperti yang terlihat pada Tabel 3, menunjukkan bahwa nilai laju erosi/deposisi menggunakan model konversi PM lebih rendah dibandingkan dengan Model MBM1. Hal ini disebabkan pada model konversi PM pengaruh dari pencangkulan (pengolahan) tanah tidak diperhitungkan, sehingga model konversi PM ini menghasilkan hasil perhitungan yang lebih rendah (*underestimate*). Hasil perhitungan menggunakan model konversi MBM1 memberikan hasil yang lebih baik, karena pada model konversi MBM 1 proses pengolahan tanah yang menyebabkan adanya perpindahan atau percampuran isotop alam  $^{137}\text{Cs}$  dari lapisan bawah dan atas tanah diperhitungkan (10).

## KESIMPULAN

Melalui hasil penelitian dapat diketahui bahwa kandungan isotop alam  $^{137}\text{Cs}$  di lokasi-lokasi penelitian lebih besar dari lokasi pembanding, sehingga menghasilkan hasil perhitungan laju erosi positif yaitu terjadi proses deposisi. Lokasi penelitian pada umumnya berupa kebun campuran yang ditanami tanaman keras dan perkebunan milik pemerintah, sehingga erosi tidak terjadi secara signifikan karena akar tanaman keras mampu mempertahankan butiran-butiran tanah dari aliran air hujan. Perhitungan laju erosi menggunakan model konversi MBM 1 lebih baik dibandingkan dengan model konversi PM

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini terlaksana atas dana dari Lembaga Non Kementerian BATAN. Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kepala Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi, Kepala Bidang Industri dan Lingkungan serta rekan-rekan di sub-Kelompok Erosi/Sedimentasi sehingga penelitian ini dapat berjalan dengan baik.

## DAFTAR PUSTAKA

1. "Rencana Tindak DAS Ciujung", laporan Utama 1 BP DAS Ciliwung-Citarum, Bogor (2010)
2. YANG, M.Y., DU, M., ZHAO, Q., MINAMI, K., and HATTA, T., "Partitioning the contribution of sheet and rill erosion using Berillium-7 and Caesium-137, Soil Science American Journal, 70, pp. 1579-1590 (2006).
3. LI Hao, ZHANG Xin-Bao, WANG Ke-Lin and WEN An-Bang, " $^{137}\text{Cs}$  Redistribution in Thin Stony Soil of a Carbonate Rock Slope in Southwest China", Soil Science Society of China, Pedosphere 21 (1), pp. 37 – 45 (2011)
4. RAFIQ, M., AHMAD, M., IQBAL, N., TARIQ, J.A., AKRAM, W., and SHAFIQ, M., "Assessment of soil losses from managed and unmanaged sites in a subcatchment of Rawal Dam, Pakistan using fallout radionuclides", In: Impact of soil conservation measures on erosion control and soil quality. IAEA-TECDOC-1665. pp. 73-85, (2011)
5. Zhang, Y., Yi Long, et all, "Spatial patterns of  $^{137}\text{Cs}$  inventories and soil erosion from earth - banked terraces in the Yimeng Mountains, China", Journal of Environmental Radioactivity 136, :pp 1 – 9 (2014)
6. BAROKAH, A., dan RAHMADI, S., "Estimasi Laju Erosi Lahan Berlereng di Kabupaten Nganjuk Dengan Teknik Cs-137", Jurnal Ilmiah Aplikasi Isotop dan Radiasi, 5 (2), Hal. 129-146, Jakarta (2009)
7. WALLING, D.E, and ZHANG, Y, HE Q, "Model for Converting Radionuclides ( $^{137}\text{Cs}$ , excess  $^{210}\text{Pb}$  And  $^7\text{Be}$ ) Measurement to estimates of soil erosion and deposition rates", Dept. Geography, Univ. Of Exeter, Exeter, EX4 4RJ, UK, (2007).
8. Zhang, X.B., Quine, T.A., Walling,D.E., and Wen, A.B., "A study of soil erosion on a steep cultivated slope in the Mt.Gongga region near Luding, Sinchuan, China, Using the  $^{137}\text{Cs}$  technique", Acta Geol.Hisp., 35, pp.229 – 238 (2000)
9. Zapata, F., Handbook for the assessment of soil erosion and sedimentology using environmental radionuclides", Dordrecht - Netherland, Kluwer Academic Publishers, pp. 96 – 110 (2002)
10. WALLING, D.E., and He, Q, "Improved Models for Estimasting Soil Erosion Rate from  $^{137}\text{Cs}$  Measurements", J. Environ. Qual (280, pp. 611 – 622 (1999)
11. Barokah Aliyanta, Nita Suhartini dan Bungkus Pratikno, "Studi Awal Penentuan Sumber Sedimen DAS Cisadane Hulu dengan Radionuklida Alam", Journal Ilmiah Aplikasi Isotop dan Radiasi, Volume 11 , No. 1, Hal. 39 – 49, Jakarta (2015)

12. Yunqi Zhang, Yi Long, Juan An, Xingxiu Yu , Xiaoli Wang, "Spatial patterns of  $^{137}\text{Cs}$  inventories and soil erosion from earth-banked terraces in the Yimeng Mountains, China", *Journal of Environmental Radioactivity* 136, pp. 1 – 9 , (2014)

Halaman ini sengaja di kosongkan

## **PENGUKURAN BOBOT INDIKATOR KESELAMATAN RADIASI DI LINGKUNGAN PTKMR- BATAN DENGAN METODE APROKSIMASI RELATIF**

**Suhaedi Muhammad**

*Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi, Gedung B, Kawasan Nuklir Pasar Jum'at  
email: [suhaedi.muhammad62@gmail.com](mailto:suhaedi.muhammad62@gmail.com)*

### **ABSTRAK**

**PENGUKURAN BOBOT INDIKATOR KESELAMATAN RADIASI DI PTKMR-BATAN DENGAN METODE APROKSIMASI RELATIF.** Guna mengetahui sejauhmana dipenuhinya persyaratan proteksi dan keselamatan radiasi di lingkungan PTKMR-BATAN telah dilakukan pengukuran bobot indikator keselamatan radiasi dan bobot indikator kesehatan dengan menggunakan metode aproksimasi relatif. Pengukuran bobot indikator ini dilakukan melalui pembagian angket terhadap 26 orang responden. Dari pengukuran yang dilakukan diperoleh hasil untuk indikator keselamatan yang dari 7 variabel ( 32 poin) ada 14 indikator yang memiliki bobot 0,038 ( 26 responden), ada 5 indikator yang memiliki bobot 0,076 ( 25 responden), ada 6 indikator yang memiliki bobot 0,115 ( 24 responden), ada 5 indikator yang memiliki bobot 0,153 ( 23 responden) dan ada 2 indikator yang memiliki bobot 0,192 ( 22 responden). Sedangkan untuk indikator kesehatan yang terdiri dari 1 variabel (5poin), ada 3 indikator yang memiliki bobot 0,038 ( 26 responden), ada 1 indikator yang memiliki bobot 0,230 ( 21 responden) dan ada 1 indikator yang memiliki bobot 0,115 ( 24 responden). Berdasarkan hasil tersebut terlihat bahwa bobot tertinggi untuk indikator keselamatan dan kesehatan adalah 0,230 sedangkan bobot terendahnya adalah 0,038.

Kata kunci: pengukuran, bobot, indikator keselamatan, radiasi

### **ABSTRACT**

**MEASUREMENT OF RADIATION SAFETY INDICATORS IN PTKMR-BATAN WITH RELATIVE APPROXIMATE METHOD.** In order to know how far the fulfillment of radiation protection and safety requirements within PTKMR-BATAN has been done measurement of the weight of the radiation safety indicator and the weight of the health indicator by using the relative approximation method. Measurement of the weight of this indicator is done through the division of questionnaires to 26 respondents. From the measurements, there are 14 indicators that have a weight of 0.038 (26 respondents), there are 5 indicators that have a weight of 0.076 (25 respondents), there are 6 indicators that have a weight of 0.115 (24 respondents), there are 5 indicators that have a weight of 0.153 (23 respondents) and there are 2 indicators that have a weight of 0.192 (22 respondents). As for health indicator which consist of 1 variable (5 points), there are 3 indicators that have weight of 0,038 (26 respondents), there is 1 indicator which has weight 0,230 (21 respondent) and there is 1 indicator which has weight 0,115 (24 respondents). Based on these results it is seen that the highest weight for safety and health indicators is 0.230 while the lowest weight is 0.038.

Keywords: measurement, weight, safety indicator, radiation

### **PENDAHULUAN**

Kepala Pusat Teknologi Keselamatan dan mterologi Radiasi-Badan Tenaga Nuklir Nasional (PTKMR-BATAN) selaku pihak yang mendapat delegasi sebagai pemegang izin (PI) pemanfaatan zat radioaktif dan/atau sumber radiasi wajib melindungi keselamatan dan kesehatan para pekerja radiasi yang menjadi tanggungjawabnya.

Salah satu usaha yang dapat dilakukan oleh PI adalah dengan mengupayakan agar besarnya dosis yang diterima oleh pekerja radiasi serendah mungkin yang dapat dicapai dengan mempertimbangkan faktor sosial dan ekonomi.

Guna mewujudkan harapan tersebut, PI dapat menyusun indikator keselamatan radiasi dengan mengacu pada Tecdoc 1141 IAEA tentang *Operational Safety Performance Indicator for Nuclear Power Plants*, Peraturan Pemerintah Nomor 33 tahun 2007 tentang Keselamatan Radiasi Pngion dan Keamanan Sumber Radioaktif, Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013 tentang Proteksi Dan Keselamatan Radiasi Dalam Pemanfaatan Tenaga Nuklir, Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 6 Tahun 2010 tentang Pemantauan Kesehatan Untuk Pekerja Radiasi dan dokumen pendukung lainnya.

Sejak Tecdoc 1141 IAEA dipublikasikan dan Peraturan Pemerintah Nomor 33 tahun 2007 serta Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013 diberlakukan belum ada satupun pemegang izin baik di lingkungan BATAN, di lingkungan industri maupun di lingkungan medis yang telah menyusun indikator keselamatan radiasi. Dengan adanya indikator keselamatan radiasi ini diharapkan bisa dijadikan sebagai salah satu tolok ukur sejauhmana dipenuhinya persyaratan proteksi dan keselamatan radiasi.

Selanjutnya untuk mengetahui sejauhmana pemenuhan terhadap indikator keselamatan radiasi di lingkungan PTKMR-BATAN, maka dipandang perlu untuk dilakukan pengukuran melalui pembagian angket dan kajian dengan menggunakan metode aproksimasi relatif.

Melalui upaya ini dapat diketahui sejauhmana para PR maupun PPR di lingkungan PTKMR-BATAN dapat mematuhi persyaratan proteksi dan keselamatan radiasi.

## **METODOLOGI**

### **Kajian Dokumen**

Dalam rangka pengukuran pemenuhan indikator keselamatan dan kesehatan di lingkungan PTKMR-BATAN, dilakukan kajian terhadap [1-10] :

1. Dokumen Peraturan Pemerintah Nomor 33 tahun 2007 tentang Keselamatan Radiasi Pngion dan Keamanan Sumber Radioaktif.
2. Dokumen Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 4 tahun 2013 tentang Proteksi dan Keselamatan Radiasi Dalam Pemanfaatan Tenaga Nuklir.
3. Dokumen Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN) Nomor 6 Tahun 2010 tentang Pemantauan Kesehatan Untuk Pekerja Radiasi.
4. Dokumen Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN) Nomor 17 Tahun 2012 tentang Keselamatan Radiasi Dalam Kedokteran Nuklir, Jakarta (2012).
5. Dokumen Peraturan Pemerintah Nomor 61 Tahun 2013 tentang Pengelolaan Limbah Radioaktif, Jakarta (2013).
6. Dokumen Tecdoc 1141 IAEA tentang *Operational Safety Performance Indicator for Nuclear Power Plants*, Vienna (2000).
7. Dokumen IAEA Safety Standards Series, *Safety of Nuclear Power Plants: Operation, Requirements*, IAEA, Vienna (2000).
8. Dokumen IAEA, INTERNATIONAL LABOUR OFFICE, *Assessment of Occupational Exposure Due to External Sources of Radiation*, IAEA Safety Standards Series No. RS-G-1.3, IAEA, Vienna (1999).
9. Dokumen IAEA, *Safety Assessment for Facilities and Activities*, IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 4, IAEA, Vienna (2009).
10. Dokumen IAEA, *Optimization of Radiation Protection in the Control of Occupational Exposure*, Safety Reports Series No. 21, IAEA, Vienna (2002).
11. Dokumen lain yang terkait.

### **Pencarian Data Informasi**

Dalam rangka pengukuran bobot indikator keselamatan radiasi di lingkungan PTKMR-BATAN telah dilakukan wawancara melalui pembagian angket pada periode 8 November 2017 sampai 4 April 2018 terhadap 26 orang responden yang mewakili PR dan PPR serta petugas khusus.

### **Obyek Pengukuran Pemenuhan Indikator Keselamatan dan Kesehatan**

Obyek pengukuran bobot indikator keselamatan radiasi di lingkungan PTKMR-BATAN terbagi ke dalam dua kategori yaitu indikator keselamatan yang terdiri dari 7 variabel (32 poin) dan indikator kesehatan yang terdiri dari 1 variabel ( 5 poin).

### **Pengolahan Hasil Pengukuran**

Penentuan bobot suatu poin baik untuk indikator keselamatan maupun indikator kesehatan dapat digunakan metode aproksimasi relatif yang dinyatakan dalam persamaan :

$$\text{Bobot Indikator} = \left(1 - \frac{b}{n} + \frac{1}{n}\right) \dots\dots (1)$$

Keterangan :

b = banyaknya responden yang menyatakan sebuah indikator telah dipenuhi dan n = banyaknya responden.

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

#### **Hasil Pengukuran Pemenuhan Indikator Keselamatan Pemenuhan Indikator Perizinan**

Berdasarkan hasil angket dari 26 orang responden, mereka menyatakan bahwa pihak PTKMR-BATAN telah memiliki perizinan pemanfaatan zat radioaktif dan/atau sumber radiasi dari BAPETEN sesuai dengan ketentuan yang ditetapkan di dalam Peraturan Pemerintah Nomor 29 tahun 2008 pasal 3 ayat 2h dan Peraturan Pemerintah Nomor 33 tahun 2007 pasal 4 ayat 1. Dengan menggunakan persamaan (1) dimana nilai b=26 dan n=26, maka indikator perizinan memiliki nilai bobot 0,038.

#### **Pemenuhan Indikator Penanggungjawab Keselamatan Radiasi**

Indikator penanggungjawab keselamatan radiasi ini terdiri dari 2 poin. Berdasarkan angket yang dibagikan diperoleh hasil :

- a. Pada indikator penanggung jawab keselamatan radiasi terdiri dari pemegang izin dan pihak lain yang terkait, ada 26 responden yang menyatakan bahwa indikator ini telah terpenuhi sesuai yang ditetapkan di dalam Peraturan Pemerintah Nomor 33 Tahun 2007 pasal 6 ayat 1 dan Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013 pasal 3 ayat 1 sehingga dengan persamaan (1) dimana nilai b=26 dan n=26 akan diperoleh bobot indikator 0,038.
- b. Pada indikator pemegang izin membentuk dan menetapkan Penyelenggara Keselamatan radiasi di dalam fasilitas atau instalasi sesuai dengan tugas dan tanggung jawabnya, ada 26 responden yang menyatakan bahwa indikator ini telah terpenuhi sesuai yang ditetapkan di dalam Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013 pasal 4 sehingga dengan persamaan (1) dimana nilai b=26 dan n=26 akan diperoleh bobot indikator 0,038.

#### **Pemenuhan Indikator Personil**

Indikator personil yang ada di PTKMR-BATAN terdiri dari 1 poin. Berdasarkan angket yang dibagikan diperoleh hasil 26 responden menyatakan bahwa personil yang ada di PTKMR-BATAN telah sesuai dengan standar yang ditetapkan di dalam Peraturan Pemerintah Nomor 33 Tahun 2007 pasal 16 ayat 2 sehingga dengan persamaan (1) dimana nilai b=26 dan n=26 akan diperoleh bobot indikator 0,038.

#### **Pemenuhan Indikator Dokumen**

Indikator dokumen yang ada di PTKMR-BATAN terdiri dari 2 poin. Dari angket yang telah dibagikan, diperoleh hasil :

- a. Pada indikator pemegang izin menyediakan, melaksanakan dan mendokumentasikan program proteksi dan keselamatan radiasi, ada 26 responden yang menyatakan bahwa indikator ini telah terpenuhi sesuai yang ditetapkan di dalam Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013 pasal 48 ayat 1 sehingga dengan persamaan (1) dimana nilai b=26 dan n=26 akan diperoleh bobot indikator 0,038.
- b. Pada indikator pemegang izin melaporkan kepada Kepala BAPETEN mengenai pelaksanaan program proteksi dan keselamatan radiasi, ada 26 responden yang menyatakan bahwa indikator ini telah terpenuhi sesuai yang ditetapkan di dalam Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013 pasal 54 ayat 2 sehingga dengan persamaan (1) dimana nilai b=26 dan n=26 akan diperoleh bobot indikator 0,038.

### **Pemenuhan Indikator Pelatihan**

Indikator pelatihan yang ada di PTKMR-BATAN ini terdiri dari 2 poin. Dari angket yang telah dibagikan, diperoleh hasil :

- a. Pada indikator pemegang izin menyelenggarakan pelatihan proteksi radiasi, ada 24 responden yang menyatakan bahwa indikator ini telah terpenuhi sesuai yang ditetapkan di dalam peraturan kepala bapeten nomor 4 tahun 2013 pasal 17 sehingga dengan persamaan (1) dimana nilai  $b=24$  dan  $n=26$  akan diperoleh bobot indikator 0,115.
- c. Pada indikator Petugas Proteksi Radiasi memiliki sertifikat serta telah mengikuti dan lulus pelatihan petugas proteksi radiasi dari lembaga pelatihan yang terakreditasi, ada 26 responden yang menyatakan bahwa indikator ini telah terpenuhi sesuai yang ditetapkan di dalam Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 16 Tahun 2014 pasal 17b sehingga dengan persamaan (1) dimana nilai  $b=26$  dan  $n=26$  akan diperoleh bobot indikator 0,038.

### **Pemenuhan Indikator Rekaman**

Indikator rekaman yang ada di PTKMR-BATAN terdiri dari 9 poin. Dari angket yang telah dibagikan, diperoleh hasil :

- a. Pada indikator hasil evaluasi dosis personal, ada 25 responden yang menyatakan bahwa indikator ini telah terpenuhi sesuai yang ditetapkan di dalam peraturan kepala bapeten nomor 4 tahun 2013 pasal 53 ayat 1 sehingga dengan persamaan (1) dimana nilai  $b=25$  dan  $n=26$  akan diperoleh bobot indikator 0,076.
- b. Pada indikator hasil pemantauan laju paparan radiasi dan kontaminasi permukaan, ada 25 responden yang menyatakan bahwa indikator ini telah terpenuhi sesuai yang ditetapkan di dalam peraturan kepala BAPETEN nomor 4 tahun 2013 pasal 53 ayat 1 sehingga dengan persamaan (1) dimana nilai  $b=25$  dan  $n=26$  akan diperoleh bobot indikator 0,076..
- c. Pada indikator hasil penanganan limbah radioaktif, ada 24 responden yang menyatakan bahwa indikator ini telah terpenuhi sesuai yang ditetapkan di dalam Peraturan Pemerintah Nomor 61 tahun 2013 sehingga dengan persamaan (1) dimana nilai  $b=24$  dan  $n=26$  akan diperoleh bobot indikator 0,115.
- d. Pada indikator hasil pemeriksaan kesehatan, ada 26 responden yang menyatakan bahwa indikator ini telah terpenuhi sesuai yang ditetapkan di dalam Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013 pasal 53 ayat 1 sehingga bobot indikatornya 0,038.
- e. Pada indikator laporan mengenai pelaksanaan program proteksi dan keselamatan radiasi, ada 23 responden yang menyatakan bahwa indikator ini telah terpenuhi sesuai yang ditetapkan di dalam Peraturan Kepala BAPETEN Pemerintah Nomor 4 tahun 2013 pasal 48 ayat 1 sehingga dengan persamaan (1) dimana nilai  $b=23$  dan  $n=26$  akan diperoleh bobot indikator 0,153
- f. Pada indikator laporan mengenai pelaksanaan penanggulangan keadaan darurat, ada 24 responden yang menyatakan bahwa indikator ini telah terpenuhi sesuai yang ditetapkan di dalam Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 1 tahun 2010 pasal 11 ayat 2 sehingga dengan persamaan (1) dimana nilai  $b=24$  dan  $n=26$  akan diperoleh bobot indikator 0,115.
- g. Pada indikator laporan pelaksanaan tindak lanjut dosis berlebih, ada 23 responden yang menyatakan bahwa indikator ini telah terpenuhi sesuai yang ditetapkan di dalam Peraturan Kepala BAPETEN Pemerintah Nomor 4 tahun 2013 pasal 18c, 19c dan 21c sehingga dengan persamaan (1) dimana nilai  $b=23$  dan  $n=26$  akan diperoleh bobot indikator 0,153.
- h. Pada indikator laporan hasil penentuan tingkat klierens, ada 24 responden yang menyatakan bahwa indikator ini telah terpenuhi sesuai yang ditetapkan di dalam Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 16 Tahun 2012 pasal 3 sehingga dengan persamaan (1) dimana nilai  $b=24$  dan  $n=26$  akan diperoleh bobot indikator 0,115.
- i. Pada indikator laporan pelaksanaan penatalaksanaan kesehatan, ada 25 responden yang menyatakan bahwa indikator ini telah terpenuhi sesuai yang ditetapkan di dalam Peraturan Pemerintah Nomor 33 Tahun 2007 pasal 13 sehingga dengan persamaan (1) dimana nilai  $b=25$  dan  $n=26$  akan diperoleh bobot indikator 0,076.

### **Pemenuhan Indikator Persyaratan Proteksi dan Keselamatan Radiasi**

Indikator pemenuhan persyaratan proteksi dan keselamatan radiasi yang ada di PTKMR-BATAN terdiri dari 3 variabel ( 15 poin). Dari angket yang telah dibagikan, diperoleh hasil :

- a. Pada indikator justifikasi, terdapat 1 poin, ada 26 responden yang menyatakan bahwa indikator ini telah terpenuhi sesuai yang ditetapkan di dalam Peraturan Kepala BAPETEN nomor 4 tahun 2013 pasal 11 sehingga dengan persamaan (1) dimana nilai  $b=26$  dan  $n=26$  akan diperoleh bobot indikator 0,038.
- b. Pada indikator limitasi dosis ( 10 poin) :
  1. Terdapat 5 poin dengan masing-masing 26 responden yang menyatakan bahwa indikator ini telah terpenuhi sesuai yang ditetapkan di dalam Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 4 tahun 2013 pasal 15,26,32,33,37,39,40 dan Peraturan Pemerintah Nomor 33 Tahun 2007 pasal 29 ayat 4 dan 5 sehingga dengan persamaan (1) dimana nilai  $b=26$  dan  $n=26$  akan diperoleh bobot indikator 0,038.
  2. pada indikator pemegang izin melakukan pembagian daerah kerja ke dalam daerah pengendalian dan daerah supervisi, ada 23 responden yang menyatakan bahwa indikator ini telah terpenuhi sesuai yang ditetapkan di dalam peraturan kepala bapeten nomor 4 tahun 2013 pasal 26 sehingga dengan persamaan (1) dimana nilai  $b=23$  dan  $n=26$  akan diperoleh bobot indikator 0,153.
  3. Pada indikator pemegang izin melakukan evaluasi daerah kerja secara berkala, ada 24 responden yang menyatakan bahwa indikator ini telah terpenuhi sesuai yang ditetapkan di dalam Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013 pasal 26 sehingga dengan persamaan (1) dimana nilai  $b=24$  dan  $n=26$  akan diperoleh bobot indikator 0,115.
  4. Pada indikator hasil penerimaan dosis personil diinformasikan kepada pekerja radiasi, ada 22 responden yang menyatakan bahwa indikator ini telah terpenuhi sesuai yang ditetapkan di dalam Peraturan Pemerintah Nomor 33 Tahun 2007 pasal 29 ayat 4 sehingga dengan persamaan (1) dimana nilai  $b=22$  dan  $n=26$  akan diperoleh bobot indikator 0,192.
  5. Pada indikator pemegang izin menyimpan dan memelihara hasil pemantauan dosis yang diterima pekerja harus paling singkat 30 (tigapuluh) tahun terhitung sejak pekerja yang bersangkutan berhenti bekerja, ada 25 responden yang menyatakan bahwa indikator ini telah terpenuhi sesuai yang ditetapkan di dalam Peraturan Pemerintah Nomor 33 Tahun 2007 pasal 29 ayat 4 sehingga dengan persamaan (1) dimana nilai  $b=25$  dan  $n=26$  akan diperoleh bobot indikator 0,076.

### **Pemenuhan Indikator Penerapan Optimisasi Proteksi dan Keselamatan Radiasi**

Indikator pemenuhan penerapan optimisasi proteksi dan keselamatan radiasi yang ada di PTKMR-BATAN terdiri dari 4 poin. Dari angket yang telah dibagikan, diperoleh hasil :

- a. Pada indikator penerapan optimisasi proteksi dan keselamatan radiasi dilaksanakan melalui prinsip optimisasi proteksi dan keselamatan radiasi yang meliputi pembatas dosis untuk pekerja radiasi dan anggota masyarakat, ada 25 responden yang menyatakan bahwa indikator ini telah terpenuhi sesuai yang ditetapkan di dalam Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013 pasal 41 dan 42 sehingga dengan persamaan (1) dimana nilai  $b=25$  dan  $n=26$  akan diperoleh bobot indikator 0,076.
- b. Pada indikator pemegang izin menetapkan nilai pembatas dosis untuk pekerja radiasi, ada 24 responden yang menyatakan bahwa indikator ini telah terpenuhi sesuai yang ditetapkan di dalam Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013 pasal 43 sehingga dengan persamaan (1) dimana nilai  $b=24$  dan  $n=26$  akan diperoleh bobot indikator 0,115.
- c. Pada indikator pemegang izin melakukan kaji ulang nilai pembatas dosis untuk pekerja radiasi, ada 23 responden yang menyatakan bahwa indikator ini telah terpenuhi sesuai yang ditetapkan di dalam Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013 pasal 45 sehingga dengan persamaan (1) dimana nilai  $b=23$  dan  $n=26$  akan diperoleh bobot indikator 0,153.
- d. Pada indikator pemegang izin menyampaikan hasil kaji ulang nilai pembatas dosis untuk pekerja radiasi kepada Kepala BAPETEN, ada 23 responden yang menyatakan bahwa indikator ini telah terpenuhi sesuai yang ditetapkan di dalam Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013 pasal 45 sehingga dengan persamaan (1) dimana nilai  $b=23$  dan  $n=26$  akan diperoleh bobot indikator 0,153.

### Hasil Pengukuran Pemenuhan Indikator Kesehatan

Indikator kesehatan yang ada di PTKMR-BATAN terdiri dari 1 variabel (4 poin). Dari angket yang telah dibagikan, diperoleh hasil :

- a. Pada indikator pemegang izin menyelenggarakan pemeriksaan kesehatan pekerja radiasi, ada 26 responden yang menyatakan bahwa indikator ini telah terpenuhi sesuai yang ditetapkan di dalam Peraturan Pemerintah Nomor 33 Tahun 2007 pasal 9 sehingga dengan persamaan (1) dimana nilai  $b=26$  dan  $n=26$  akan diperoleh bobot indikator 0,038.
- b. Pada indikator pemeriksaan awal dilakukan pada setiap orang yang akan bekerja sebagai pekerja radiasi, ada 26 responden yang menyatakan bahwa indikator ini telah terpenuhi sesuai yang ditetapkan di dalam Peraturan Pemerintah Nomor 33 Tahun 2007 pasal 9a sehingga dengan persamaan (1) dimana nilai  $b=26$  dan  $n=26$  akan diperoleh bobot indikator 0,038.
- c. Pada indikator pemeriksaan kesehatan berkala selama bekerja, ada 26 responden yang menyatakan bahwa indikator ini telah terpenuhi sesuai yang ditetapkan di dalam Peraturan Pemerintah Nomor 33 Tahun 2007 pasal 9b sehingga dengan persamaan (1) dimana nilai  $b=26$  dan  $n=26$  akan diperoleh bobot indikator 0,038.
- d. Pada indikator pemeriksaan kesehatan pada pekerja radiasi yang akan memutuskan hubungan kerja, ada 21 responden yang menyatakan bahwa indikator ini telah terpenuhi sesuai yang ditetapkan di dalam Peraturan Pemerintah Nomor 33 Tahun 2007 pasal 9b sehingga dengan persamaan (1) dimana nilai  $b=21$  dan  $n=26$  akan diperoleh bobot indikator 0,230.
- e. Pada indikator pemantauan kesehatan meliputi: pemeriksaan kesehatan, konseling, dan penatalaksanaan kesehatan pekerja yang mendapatkan paparan radiasi berlebih, ada 24 responden yang menyatakan bahwa indikator ini telah terpenuhi sesuai yang ditetapkan di dalam Peraturan Pemerintah Nomor 33 Tahun 2007 pasal 9b sehingga dengan persamaan (1) dimana nilai  $b=24$  dan  $n=26$  akan diperoleh bobot indikator 0,115.

Berdasarkan hasil di atas menunjukkan bahwa masalah pemeriksaan kesehatan pada pekerja radiasi yang akan memutuskan hubungan kerja ternyata ada 4 responden yang menyatakan bahwa hal itu belum dilakukan serta ada 2 responden yang menyatakan bahwa penatalaksanaan kesehatan pekerja yang mendapatkan paparan radiasi berlebih belum dilakukn oleh PI.

### Rekapitulasi Hasil Pengukuran Pemenuhan Indikator Keselamatan dan Kesehatan

Rekapitulasi hasil pengukuran pemenuhan indikator keselamatan dan kesehatan untuk pekerja radiasi maupun petugas proteksi radiasi yang ada di PTKMR-BATAN secara lengkap diberikan pada Tabel 1.

### KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengukuran bobot indikator keselamatan radiasi dan indikator kesehatan di lingkungan PTKMR-BATAN sebagaimana diberikan pada Tabel 1 diperoleh hasil untuk indikator keselamatan yang dari 7 variabel ( 32 poin) ada 14 indikator yang memiliki bobot 0,038 ( 26 responden), ada 5 indikator yang memiliki bobot 0,076 ( 25 responden), ada 6 indikator yang memiliki bobot 0,115 ( 24 responden), ada 5 indikator yang memiliki bobot 0,153 ( 23 responden) dan ada 2 indikator yang memiliki bobot 0,192 ( 22 responden). Sedangkan untuk indikator kesehatan yang terdiri dari 1 variabel (5poin), ada 3 indikator yang memiliki bobot 0,038 ( 26 responden), ada 1 indikator yang memiliki bobot 0,230 ( 21 responden) dan ada 1 indikator yang memiliki bobot 0,115 ( 24 responden).

### DAFTAR PUSTAKA

1. Sekretariat Negara, "Peraturan Pemerintah Nomor 33 tahun 2007 tentang Keselamatan Radiasi Pengion dan Keamanan Sumber Radioaktif ", Jakarta (2007).
2. Badan Pengawas Tenaga nuklir, "Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013 tentang Proteksi dan Keselamatan Radiasi Dalam Pemanfaatan Tenaga Nuklir", Jakarta (2013).

3. Badan Pengawas Tenaga Nuklir, "Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN) Nomor 6 Tahun 2010 tentang Pemantauan Kesehatan Untuk Pekerja Radiasi", Jakarta (2010).
4. Badan Pengawas Tenaga Nuklir, "Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN) Nomor 17 Tahun 2012 tentang Keselamatan Radiasi Dalam Kedokteran Nuklir", Jakarta (2012).
5. Sekretariat Negara, "Peraturan Pemerintah Nomor 61 Tahun 2013 tentang Pengelolaan Limbah Radioaktif", Jakarta (2013).
6. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, "Operational Safety Performance Indicator for Nuclear Power Plants", Tecdoc 1141 IAEA, Vienna (2000).
7. IAEA Safety Standards Series, "Safety of Nuclear Power Plants: Operation, Requirements", IAEA Vienna (2000).
8. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, INTERNATIONAL LABOUR OFFICE, "Assessment of Occupational Exposure Due to External Sources of Radiation, IAEA Safety Standards Series No. RS-G-1.3", IAEA, Vienna (1999).
9. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, "Safety Assessment for Facilities and Activities, IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 4", IAEA, Vienna (2009).
10. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, "Optimization of Radiation Protection in the Control of Occupational Exposure", Safety Reports Series No. 21, IAEA, Vienna (2002).
11. IAEA Safety Series No. 50-SG-O5, "Radiation Protection during Operation of Nuclear Power Plants", IAEA Vienna (1983).
12. IAEA Safety Series No. 103, "Provision of Operational Radiation Services at Nuclear Power Plants", IAEA Vienna (1990).
13. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, INTERNATIONAL LABOUR OFFICE, "Assessment of Occupational Exposure Due to Intakes of Radionuclides", IAEA, Safety Standards Series No. RS-G-1.2, IAEA, Vienna (1999).
14. European Association of Nuclear Medicine, "Radiation Protection and Dose Optimisation", Vienna (2016).
15. International Commission on Radiological Protection, "The 2007 recommendations of the International Commission on Radiological protection", ICRP Publication 103. Annals of the ICRP (2007).
16. Madan, Rahani, "Radiation Units, Limits Dose and Dose Constraints", IAEA Vienna (2011).
17. Budiarto, Eko, "Biostatistika untuk Kedokteran dan Kesehatan Masyarakat", EGC, Jakarta (2001).
18. Anizar, 2009, "Teknik Keselamatan dan Kesehatan Kerja", Graha Ilmu, Yogyakarta (2009).
19. Ghony, MD dan Fauzan Almanshur, "Metodologi Penelitian Kualitatif", Ar-Ruzz Media, Yogyakarta (2012).
20. Moleong, Lexy J, "Metodologi Penelitian Kualitatif", PT Remaja Rosdakarya, Bandung (2012).
21. Ridley, John, "Ihtisar Kesehatan dan Keselamatan Kerja", Edisi Ketiga, Erlangga, Jakarta (2006).
22. Sugiyono, "Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D, Alfabeta, Bandung (2012).
23. Uthami, Rian, Rini Mutahar, dan Hamzah Hasyim, "Analisis Manajemen Keselamatan Radiasi pada Instalasi Radiologi RSUD DR. H. M. Rabain Muara Enim Tahun 2009", Makalah disajikan dalam Seminar Nasional Keselamatan Kesehatan dan Lingkungan VI Jakarta, 15-16 Juni, hal 154-161, Jakarta (2010).
24. Dianasari, Tri, "Gambaran Penerapan Manajemen Keselamatan Radiasi Dalam Penggunaan Pesawat Sinar x di Instalasi Radiologi RSUD Ungaran Kabupaten Semarang Tahun 2016", Tugas Akhir Di Jurusan Ilmu Kesehatan Masyarakat, Fakultas Ilmu Keolahragaan, universitas Negeri Semarang (2016).

TABEL 1. REKAPITULASI HASIL PENGUKURAN BOBOT INDIKATOR KESELAMATAN RADIASI DAN KESEHATAN

No.	Ruang Lingkup	Standar Peraturan	Pasal	Hasil Pengukuran Responden (orang)	Bobot
<b>1. INDIKATOR KESELAMATAN</b>					
1.1.	Perizinan				
1.1.1.	PTKMR-BATAN telah memiliki izin dari Kepala BAPETEN dan memenuhi persyaratan keselamatan radiasi.	Peraturan Pemerintah Nomor 29 Tahun 2008.	3 ayat 2h	26	0,038
1.2.	Penanggungjawab Keselamatan Radiasi				
1.2.1.	Penanggung jawab keselamatan radiasi terdiri dari pemegang izin dan pihak lain yang terkait.	Peraturan Pemerintah Nomor 33 Tahun 2007. Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013	6 ayat 1 3 ayat 1	26	0,038
1.2.1.	Pemegang izin membentuk dan menetapkan Penyelenggara Keselamatan radiasi di dalam fasilitas atau instalasi sesuai dengan tugas dan tanggung jawabnya.	Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013	4	26	0,038
1.3.	Personil				
1.3.1.	Personil terdiri atas: a. Petugas proteksi radiasi. b. Pekerja radiasi. c. Petugas khusus.	Peraturan Pemerintah Nomor 33 Tahun 2007	16 ayat 2	26	0,038
1.4.	Dokumen				
1.4.1.	Pemegang izin menyediakan, melaksanakan dan mendokumentasikan program proteksi dan keselamatan radiasi.	Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013	48 ayat 1	26	0,038
1.4.2.	Pemegang izin melaporkan kepada Kepala BAPETEN mengenai pelaksanaan program proteksi dan keselamatan radiasi,	Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013	54 ayat 1	26	0,038
1.5.	Pelatihan				
1.5.1.	Pemegang izin menyelenggarakan pelatihan proteksi radiasi.	Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013	17	24	0,115
1.5.2.	Petugas Proteksi Radiasi memiliki sertifikat serta telah mengikuti dan lulus pelatihan petugas proteksi radiasi dari lembaga pelatihan yang terakreditasi.	Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013	17b	26	0,038

No.	Ruang Lingkup	Standar Peraturan	Pasal	Hasil Pengukuran Responden (orang)	Bobot
1.6.	Rekaman				
1.6.1.	Hasil evaluasi dosis personil	Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013	53 ayat 1	25	0,076
1.6.2.	Hasil pemantauan laju paparan radiasi dan kontaminasi permukaan	Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013	53 ayat 1	25	0,076
1.6.3.	Hasil penanganan limbah radioaktif	Peraturan Pemerintah Nomor 61 tahun 2013		24	0,115
1.6.4.	Hasil pemeriksaan kesehatan	Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013	53 ayat 1	26	0,038
1.6.5.	Laporan mengenai pelaksanaan program proteksi dan keselamatan radiasi	Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013	48 ayat 1	23	0,153
1.6.6.	Laporan mengenai pelaksanaan penanggulangan keadaan darurat	Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 1 Tahun 2010	11 ayat 2	24	0,115
1.6.7.	Laporan pelaksanaan tindaklanjut dosis berlebih.	Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013	18c, 19c dan 21 c	23	0,153
1.6.8.	Laporan hasil penentuan tingkat klierens	Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 16 Tahun 2012	3	24	0,115
1.6.9.	Laporan pelaksanaan penatalaksanaan kesehatan.	Peraturan Pemerintah Nomor 33 Tahun 2007	13	25	0,076
1.7.	Pemenuhan Persyaratan Proteksi dan Keselamatan Radiasi				
1.7.1.	Justifikasi				
1.7.1.1.	Justifikasi bagi pekerja radiasi untuk bekerja di daerah radiasi dan/atau kontaminasi berdasarkan persetujuan pemegang izin dengan dasar azas manfaat.	Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013	11	26	0,038
1.7.2.	Limitasi Dosis				
1.7.2.1.	Nilai batas Dosis untuk pekerja radiasi tidak melampaui Dosis efektif sebesar 20 mSv per tahun rata-rata selama 5 tahun berturut-turut	Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013	15	26	0,038
1.7.2.2.	Pemegang izin melakukan pembagian daerah kerja ke dalam daerah pengendalian dan daerah supervisi.	Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013	26	23	0,153

No.	Ruang Lingkup	Standar Peraturan	Pasal	Hasil Pengukuran Responden (orang)	Bobot
1.7.2.3.	Pemegang izin menyelenggarakan program pemantauan paparan radiasi dan kontaminasi di daerah kerja.	Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013	32	26	0,038
1.7.2.4.	Pemegang izin menyelenggarakan program pemantauan radioaktivitas lingkungan di luar fasilitas.	Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013	33	22	0,192
1.7.2.5.	Pemegang izin menyelenggarakan program pemantauan dosis personil (eksterna dan interna) secara berkala.	Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013	33	26	0,038
1.7.2.6.	Pemegang izin melakukan evaluasi terhadap dosis yang diterima pekerja radiasi.	Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013	33	26	0,038
1.7.2.7.	Pemegang izin menyediakan perlengkapan proteksi radiasi.	Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013	37,39,40	26	0,038
1.7.2.8.	Pemegang izin melakukan evaluasi daerah kerja secara berkala.	Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013	26	24	0,115
1.7.2.9.	Hasil penerimaan dosis personil diinformasikan kepada pekerja radiasi.	Peraturan Pemerintah Nomor 33 Tahun 2007.	29 ayat 4	22	0,192
1.7.2.10.	Pemegang izin menyimpan dan memelihara hasil pemantauan dosis yang diterima pekerja harus paling singkat 30 (tigapuluh) tahun terhitung sejak pekerja yang bersangkutan berhenti bekerja.	Peraturan Pemerintah Nomor 33 Tahun 2007.	29 ayat 5	25	0,076
1.7.3.	Penerapan Optimisasi Proteksi dan Keselamatan Radiasi				
1.7.3.1.	Penerapan optimisasi proteksi dan keselamatan radiasi dilaksanakan melalui prinsip optimisasi proteksi dan keselamatan radiasi yang meliputi pembatas dosis untuk pekerja radiasi dan anggota masyarakat.	Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013	41,42	25	0,076
1.7.3.2.	Pemegang izin menetapkan nilai pembatas dosis untuk pekerja radiasi	Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013	43	24	0,115
1.7.3.3.	Pemegang izin melakukan kaji ulang nilai pembatas dosis untuk pekerja radiasi.	Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013	45	23	0,153
1.7.3.4.	Pemegang izin menyampaikan hasil kaji ulang nilai pembatas dosis untuk pekerja radiasi kepada Kepala BAPETEN.	Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013	45	23	0,153

2. INDIKATOR KESEHATAN							
2.1.	Pemantauan Kesehatan						
2.1.1.	Pemegang izin menyelenggarakan pemeriksaan kesehatan pekerja radiasi	Peraturan Pemerintah Nomor 33 Tahun 2007.	33	9	26	0,038	
2.1.2.	Pemeriksaan awal dilakukan pada setiap orang yang akan bekerja sebagai pekerja radiasi	Peraturan Pemerintah Nomor 33 Tahun 2007.	33	9a	26	0,038	
2.1.3.	Pemeriksaan kesehatan berkala selama bekerja	Peraturan Pemerintah Nomor 33 Tahun 2007.	33	9b	26	0,038	
2.1.4.	Pemeriksaan kesehatan pada pekerja radiasi yang akan memutuskan hubungan kerja	Peraturan Pemerintah Nomor 33 Tahun 2007.	33	9c	21	0,230	
2.1.5.	Pemantauan kesehatan meliputi: pemeriksaan kesehatan, konseling, dan penatalaksanaan kesehatan pekerja yang mendapatkan paparan radiasi berlebih	Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 6 Tahun 2010		4	24	0,115	

**Halaman ini sengaja di kosongkan**

## **KAJIAN TEKNIS BAHAYA EKSTERNAL AKIBAT ULAH MANUSIA ASPEK LEDAKAN UNTUK INSTALASI NUKLIR**

**Nur Siwhan**

*Pusat Pengkajian Sistem dan Teknologi Pengawasan Instalasi dan Bahan Nuklir-BAPETEN  
Jl. Gajah Mada No. 8 Jakarta Pusat 10120  
email: n.siwhan@bapeten.go.id*

### **ABSTRAK**

**KAJIAN TEKNIS BAHAYA EKSTERNAL AKIBAT ULAH MANUSIA ASPEK LEDAKAN UNTUK INSTALASI NUKLIR.** Ledakan dari instalasi kimia di sekitar instalasi nuklir akan memberikan dampak yang signifikan terhadap fasilitas nuklir bergantung pada karakteristik material dan kuantitas bahan yang mudah meledak itu sendiri. Peraturan Kepala (Perka) BAPETEN No. 6 Tahun 2008 menjelaskan tahapan evaluasi yang perlu dilakukan oleh Pemohon Evaluasi Tapak (PET) dalam melakukan evaluasi aspek Kejadian Eksternal Akibat Ulah Manusia (KAUM), akan tetapi di dalam Perka tersebut tidak dijelaskan bagaimana melakukan evaluasi bahaya ledakan industri kimia. Tidak terdapatnya ketentuan evaluasi bahaya di Perka tersebut mengakibatkan evaluator akan mengalami kesulitan dalam melakukan evaluasi keselamatan Laporan Evaluasi Tapak, bagi PET sendiri, dengan tidak terdapatnya rincian evaluasi bahaya tersebut di Perka juga cukup menyulitkan, terutama dalam membuat skenario apa saja yang diperlukan untuk analisis keselamatan. Metodologi yang digunakan adalah dengan studi literatur terhadap beberapa dokumen terkait. Tujuan penulisan makalah ini adalah memberikan contoh analisis skenario ledakan serta melakukan evaluasi bahaya ledakan pada aspek bahaya eksternal akibat ulah manusia. Dari kajian ini dapat disimpulkan bahwa terdapat beberapa penentuan penapisan pendekatan kebolehjadian, penentuan skenario ledakan dan juga evaluasi bahaya yang dapat digunakan untuk analisis keselamatan terhadap ledakan.

Kata kunci: ledakan instalasi kimia, evaluasi bahaya, skenario ledakan.

### **ABSTRACT**

**TECHNICAL STUDY OF EXTERNAL HAZARDS FROM HUMAN INDUCED ASPECTS OF EXPLOSION FOR NUCLEAR INSTALLATION.** Explosion from the chemical installation located near from nuclear installation will have a significant influence on the nuclear installation depending on material characteristics and quantity of material itself. Bapeten Chairman Regulation (BCR) No. 6 year of 2008 already describes the evaluation stages that need to be performed by the applicant to perform an evaluation of external events due to human induced event, unfortunately in BCR No. 6 year of 2008 there is no detailed staged to performed hazards evaluation. The issues cause evaluators have difficulty to evaluate the safety document and applicants have difficulty to make scenario of hazards. The methodology used in the paper is literature study of several related documents. The purpose of this paper is to provide an example of an analysis of explosion scenarios and hazard evaluation on aspects of external hazards caused by human induced event. From the study it can be concluded that there are some screening probabilities, determination of explosion scenarios and also hazard analysis that can be used to analyze the safety.

Keyword: explosion of chemical installation, hazard analysis, scenario of explosion.

### **PENDAHULUAN**

Kegiatan Industri kimia yang mengolah, menyimpan, mengedarkan, mengangkut dan mempergunakan bahan-bahan kimia berbahaya akan terus meningkat sejalan dengan perkembangan pembangunan sehingga akan berpotensi untuk menimbulkan bahaya besar bagi industri ini sendiri, tenaga kerja, masyarakat, lingkungan maupun sumber daya lainnya [1].

Terdapatnya instalasi nuklir yang dibangun dekat dengan kawasan industri kimia berpotensi untuk terpengaruh bahaya dari instalasi kimia seperti ledakan, kebakaran maupun lepasan bahan kimia berbahaya dan beracun. Ledakan dari instalasi di sekitar instalasi nuklir akan memberikan dampak yang signifikan terhadap fasilitas nuklir bergantung pada karakteristik material dan kuantitas bahan yang mudah meledak itu sendiri.

Perka BAPETEN No. 6 Tahun 2008 tentang Evaluasi Tapak Reaktor Daya untuk Aspek Kejadian Eksternal Akibat Ulah Manusia mengatur PET dalam melakukan evaluasi tapak reaktor daya untuk aspek KAUM yang tidak disengaja dan berasal dari sumber di sekitar tapak yang tidak secara langsung terkait dengan status operasi di reaktor daya, ledakan.

Dalam Perka tersebut dijelaskan tahapan evaluasi yang perlu dilakukan oleh PET dalam melakukan evaluasi aspek KAUM, akan tetapi di dalam Perka tersebut tidak dijelaskan bagaimana melakukan evaluasi bahaya ledakan industri kimia.

Tidak terdapatnya evaluasi bahaya di perka tersebut mengakibatkan evaluator akan mengalami kesulitan dalam melakukan evaluasi keselamatan Laporan Evaluasi Tapak (LET) seperti pengalaman mengevaluasi LET Reaktor Daya Non Komersial (RDNK) yang diajukan oleh Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN). Sedangkan bagi PET sendiri, dengan tidak terdapatnya rincian evaluasi bahaya tersebut di Perka juga cukup menyulitkan, terutama dalam membuat skenario apa saja yang diperlukan untuk analisis keselamatan. Tujuan penulisan makalah ini adalah memberikan uraian analisis skenario bahaya ledakan serta evaluasi bahaya yang terjadi akibat ledakan pada aspek bahaya eksternal akibat ulah manusia.

## **POKOK BAHASAN**

Pokok permasalahan yang akan dikaji dalam makalah ini adalah :

- Identifikasi sumber dan penapisan aspek ledakan.

Tahap pertama ini merupakan tahapan penting dalam evaluasi bahaya ledakan akibat ulah manusia. Pada tahap ini PET harus melakukan identifikasi semua sumber bahaya yang mungkin terjadi di tapak tersebut baik dari sumber bergerak maupun sumber tidak bergerak. Jika semua sumber tersebut sudah diidentifikasi, maka perlu dilakukan penapisan aspek ledakan.

- Evaluasi rinci

Evaluasi rinci perlu untuk dilakukan apabila berdasarkan identifikasi sumber dan penapisan aspek bahaya tersebut mempunyai tingkat kebolehjadian yang lebih besar dibandingkan dengan nilai penapisan kebolehjadian yang telah ditetapkan. Evaluasi rinci dilakukan dengan membuat beberapa skenario kejadian.

- Evaluasi bahaya

Akibat terjadinya ledakan di sumber bahaya mengakibatkan terjadinya gelombang ledakan, radiasi panas dan fragmen-fragmen yang terlontar dan menjalar selama dan setelah ledakan. Bahaya ini perlu dievaluasi terhadap keselamatan pekerja dan instalasi nuklir.

## **METODOLOGI**

Dalam kajian ini, metodologi yang digunakan adalah dengan studi literatur terhadap beberapa dokumen terkait dengan aspek bahaya ledakan akibat ulah manusia seperti yang terdapat di daftar pustaka.

## **HASIL DAN PEMBAHASAN**

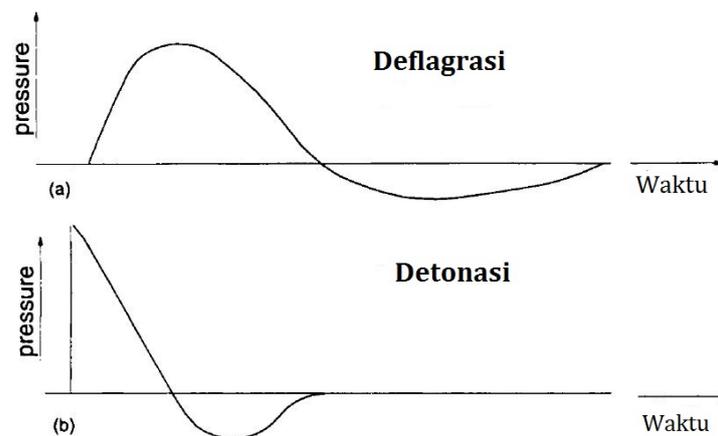
### **IDENTIFIKASI SUMBER DAN PENAPISAN**

Kejadian ledakan perlu diidentifikasi dalam mengevaluasi keselamatan tapak reaktor daya. Ledakan dapat didefinisikan sebagai suatu fenomena hembusan berupa gelombang tekan atau kejut yang dihasilkan di udara dengan pelepasan energi yang cepat. Proses terjadinya ledakan dapat dikategorikan ke dalam dua mekanisme, yakni ledakan kimia dan ledakan mekanik. Ledakan kimia terjadi akibat pemanasan dari reaksi produk dan perubahan dalam jumlah mol reaksi tersebut sedangkan ledakan mekanik atau fisik terjadi akibat pelepasan energi yang terkandung dalam material/bahan/zat tertentu.

Parameter yang secara signifikan mempengaruhi kelakuan ledakan adalah temperatur dan tekanan ambien, komposisi material yang mudah meledak; properti fisik material yang mudah meledak; durasi, jenis, dan energi pengapian; geometri sekitar (apakah berada di ruang terbuka atau tertutup); jumlah material yang mudah meledak; serta laju pelepasan material yang mudah meledak [2].

Kejadian ledakan yang biasa terjadi di pabrik pemrosesan biasanya disebabkan oleh terlepasnya sejumlah energi dari bahan kimia dapat dikategorikan ke dalam deflagrasi atau detonasi. Pada deflagrasi, mekanisme perambatan ledakan menuju bahan yang tidak bereaksi melalui perpindahan massa dan panas. Material yang berada di sekitar lokasi

kejadian awal ledakan terkena panas (di bawah temperatur autoignisinya) sehingga menyediakan reaksi untuk merambat. Perpindahan energi pada proses ini cukup lambat, laju perambatan relatif kecil dari kecepatan bunyi/suara artinya efek dari ledakan terjadi setelah terdengar bunyi [2,3]. Tekanan berlebih yang dihasilkan dari proses deflagrasi umumnya tidak lebih dari 1 atau 2 atmosfer (atm) [4]. Di dalam detonasi, mekanisme perambatan ledakan terjadi melalui pemanasan kompresi secara tiba-tiba. Kecepatan perambatan proses detonasi lebih besar dari kecepatan bunyi/suara sehingga efek ledakan terjadi sebelum terdengar bunyi [2,3]. Detonasi dapat menghasilkan kerusakan yang lebih parah dari deflagrasi, tekanan berlebih yang dihasilkan oleh detonasi dapat mencapai ratusan psig [4]. Profil tekanan berlebih terhadap waktu yang dihasilkan dari deflagrasi dan detonasi sangat berbeda seperti disajikan pada Gambar 1. Pada kurva ini terlihat bahwa detonasi mencapai tekanan berlebih maksimum dalam waktu yang sangat cepat.



Gambar 1. Kurva tekanan terhadap waktu yang dihasilkan dari (a) deflagrasi dan (b) detonasi [3].

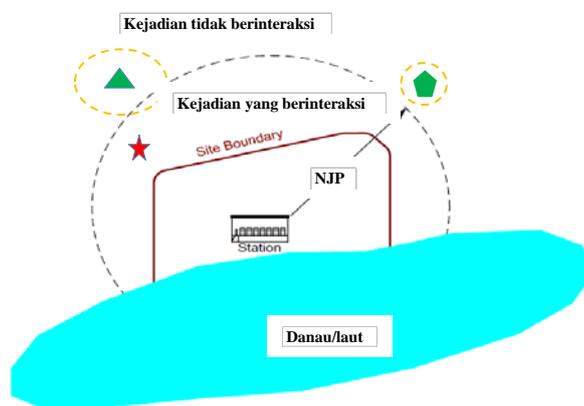
Kejadian ledakan yang sering ditemukan di industri proses diantaranya adalah ledakan gas/uap dan ledakan partikulat. Noda bahaya kejadian ledakan pada aktivitas/industri minyak dan gas bumi seperti instalasi produksi minyak dan gas bumi baik di onshore maupun offshore, kilang minyak dan gas, sistem transportasi minyak dan gas (perpipaan, kapal laut, kereta api, truk, dll.). Di industri proses petrokimia, kimia dan metalurgi, noda bahaya dapat ditemukan di industri petrokimia yang memproduksi bahan kimia dan polimer, industri yang memproduksi obat-obatan, pestisida, pigmen organik, dll.; pabrik cat, pabrik peleburan logam, pabrik yang memproduksi selulosa dan kertas dari kayu. Dalam pemrosesan mekanik, noda bahaya ditemukan pada penyimpanan umpan seperti gandum, mesin penggilingan terigu, penyulingan/pemurnian gula, dll [5].

Ledakan gas/uap terjadi ketika bahan bercampur dengan udara ketika gas mudah terbakar terlepas ke atmosfer awan eksplosif terbentuk dengan cepat. Ledakan gas/uap ini dapat diinisiasi di dalam peralatan proses tetapi kejadian awal yang sering terjadi dihasilkan dari luar peralatan proses yang diikuti oleh hilangnya fungsi keselamatan akibat kebocoran atau kegagalan peralatan. Berbeda dengan ledakan partikulat yang umumnya terjadi di dalam peralatan proses seperti alat pencampur (*blender/mixer*), alat penggiling, elevator timba, sistem pneumatik konveyor, silo atau hopper, mesin siklon dan alat penyaring [5].

#### Penapisan pendekatan Jarak/deterministik

Identifikasi sumber yang berpotensi menimbulkan kejadian ledakan dilakukan terhadap sumber bergerak dan sumber tidak bergerak di sekitar calon tapak. Seperti disebutkan dalam PERKA No. 6 pada BAB II, sumber tidak bergerak yang perlu diidentifikasi menimbulkan kejadian ledakan meliputi kilang minyak, pabrik instalasi kimia, depo penyimpanan, jaringan transmisi penyiaran, operasi penambangan atau penggalian, fasilitas nuklir lainnya, peralatan berputar dengan energi tinggi. Adapun sumber bergerak yang perlu diidentifikasi menimbulkan kejadian ledakan meliputi kereta penumpang dan barang, kendaraan darat, kapal laut, kapal tongkang serta jalur perpipaan. Evaluasi harus dilakukan terhadap sumber yang berada di dalam Nilai Jarak Penapisan (NJP) meliputi sifat dan

jumlah bahan yang dapat meledak, serta jarak dan arah pusat ledakan dari tapak. Beberapa negara menerapkan NJP pada kisaran 5 km sampai 10 km untuk kejadian ledakan [6]. Adapula yang menerapkan nilai NJP mengikuti formula berikut untuk tekanan berlebih kurang dari 0,07 bar [6]. Ilustrasi nilai NJP ini dapat dilihat di gambar 2.



Gambar 2. Ilustrasi NJP, modifikasi dari [6].

Legenda:

- ▲ : instalasi kimia 1
- ◆ : instalasi kimia 2
- ★ : instalasi kimia 3
- : analisis bahaya ledakan

Garis hitam putus-putus menandakan NJP yang telah ditetapkan. Terdapat industri kimia 1 dan 2 yang terletak di luar NJP sehingga tidak perlu dilakukan tahapan selanjutnya, meskipun analisis bahaya ledakan/kebakaran atau lepasan bahan kimia dan berbahaya di industri kimia 1 masuk kedalam NJP. Industri kimia 3 terletak di dalam NJP, sehingga industri 3 ini perlu dilakukan tahapan selanjutnya, yaitu penapisan kebolehjadian kejadian.

### Penapisan pendekatan probabilistik

Penapisan juga dilakukan berdasarkan kebolehjadian terjadinya ledakan. Basisnya adalah frekuensi untuk kerusakan pada inti reaktor kurang dari  $10^{-7}$  per tahun. Hal ini dicapai ketika frekuensi kejadian total dari kejadian gelombang tekanan ledakan (jumlah semua kontribusi dari detonasi dan deflagrasi) ditentukan kurang dari  $10^{-5}$  per tahun. Apabila syarat tersebut terpenuhi maka tapak dapat dikatakan terbebas dari efek bahaya dari kejadian ledakan, pertimbangan khusus mungkin dapat dilakukan untuk beberapa kasus [7].

Frekuensi terjadinya detonasi lebih rendah dibandingkan dengan kejadian deflagrasi. Selama jarak area kejadian awal deflagrasi lebih besar dari 100 meter dari tapak reaktor daya, tidak ada dampak bahaya terhadap struktur bangunan tapak reaktor daya. Apabila terdapat kecelakaan pada bahan yang berpotensi terjadi detonasi, misal detonasi terjadi pada jalur transportasi atau pada instalasi tetap suatu pabrik/industri, maka frekuensi tahunan gelombang tekanan oleh bahan peledak ini dapat diestimasi dengan persamaan berikut [7].

$$H_{E,SMZ} = H_{U,SMZ} \cdot W_Z \quad (1)$$

Dengan:

- $H_{E,SMZ}$  : Frekuensi tahunan dari gelombang tekanan ledakan oleh bahan peledak, amunisi atau gas yang secara eksotermis terpecah di sekitar tapak reaktor daya.
- $H_{U,SMZ}$  : Frekuensi tahunan dari kecelakaan oleh bahan peledak, amunisi atau gas yang secara eksotermis terpecah di sekitar tapak reaktor daya.
- $W_Z$  : Kebolehjadian bergantung pada tingkat pengapian dalam kecelakaan.

Dalam kasus ledakan gas/uap, bahan mudah meledak ini bercampur dengan udara dan membentuk awan gas eksplosif. Awan gas eksplosif ini memungkinkan untuk bergerak dari tempat kejadian kecelakaan menuju tapak. Dalam kondisi ini, deflagrasi bisa saja terjadi di

area tapak. Frekuensi kejadian gelombang tekanan oleh ledakan deflagrasi ini dapat dilakukan melalui pendekatan pada persamaan berikut [7].

$$H_{E,GLG} = H_{U,GLG} \cdot W_M \cdot W_D \cdot W_Z \quad (2)$$

Dengan:

- $H_{E,GLG}$  : frekuensi tahunan dari gelombang tekanan ledakan oleh campuran gas mudah meledak dan udara di sekitar area tapak
- $H_{U,GLG}$  : frekuensi tahunan dari kecelakaan gas mudah terbakar di sekitar area tapak
- $W_M$  : kebolehjadian bergantung pada peningkatan awan gas eksplosif jika terjadi kecelakaan pada gas yang mudah terbakar
- $W_D$  : kebolehjadian bergantung pada pergerakan awan gas eksplosif menuju area tapak (sebagai hasil rata-rata dari arah angin yang muncul)
- $W_Z$  : kebolehjadian bergantung pada tingkat pengapian di area tapak

Frekuensi terjadinya kecelakaan pada saat transportasi bahan mudah meledak perlu diestimasi. Informasi perlu dikumpulkan terkait dengan kejadian kecelakaan transportasi. Statistik kecelakaan kereta api mengacu pada Federal Minister for Research and Development di Jerman [8] adalah sebagai berikut.

$$h_{UEG,B} = \frac{1}{2.10a} \quad (3)$$

$$H_{UEG,B} = \frac{h_{UEG,B}}{L_{E,B}} \cdot n \cdot l \quad (4)$$

Dengan:

- $H_{UEG,B}$  : frekuensi tahunan kecelakaan transportasi dari bahan berbahaya yang mudah meledak pada rel di daerah sekitar tapak
- $L_{E,B}$  : kilometer transport kereta api per tahun pada saat pengangkutan bahan mudah meledak
- $n$  : banyaknya transportasi per tahun saat pengangkutan bahan mudah meledak melewati tapak
- $l$  : panjang  $l$  di sepanjang tapak (misalnya  $l = 2$  km) yang dapat menyebabkan situasi berbahaya bagi tapak

$$l = 2\sqrt{r^2 - a^2} \quad (5)$$

Dengan:

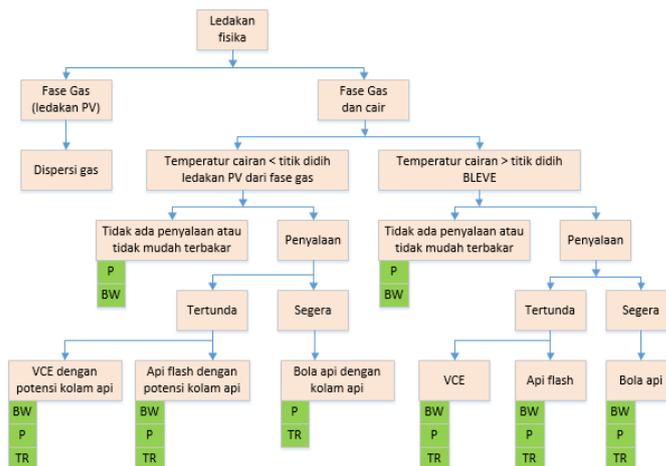
- $r$  : radius dari tapak
- $a$  : jarak minimum dari jalur rel terhadap tapak

## EVALUASI RINCI

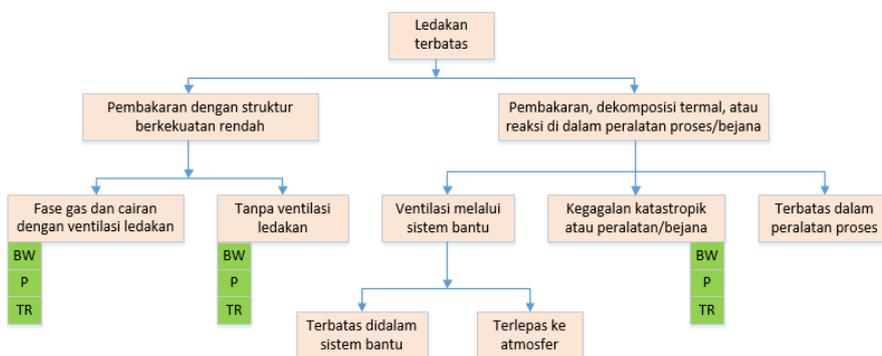
Evaluasi rinci dilakukan apabila kebolehjadian ledakan di sekitar tapak melampaui nilai *Screening Probability Level* (SPL). Evaluasi rinci dilakukan dengan menggunakan data spesifik dan rinci yang didapatkan dari sumber yang berpotensi di sekitar tapak. Kebolehjadian kecelakaan diasumsikan dalam kondisi bahwa kecelakaan telah terjadi dan awan eksplosif telah terbentuk.

### Penentuan Skenario Ledakan

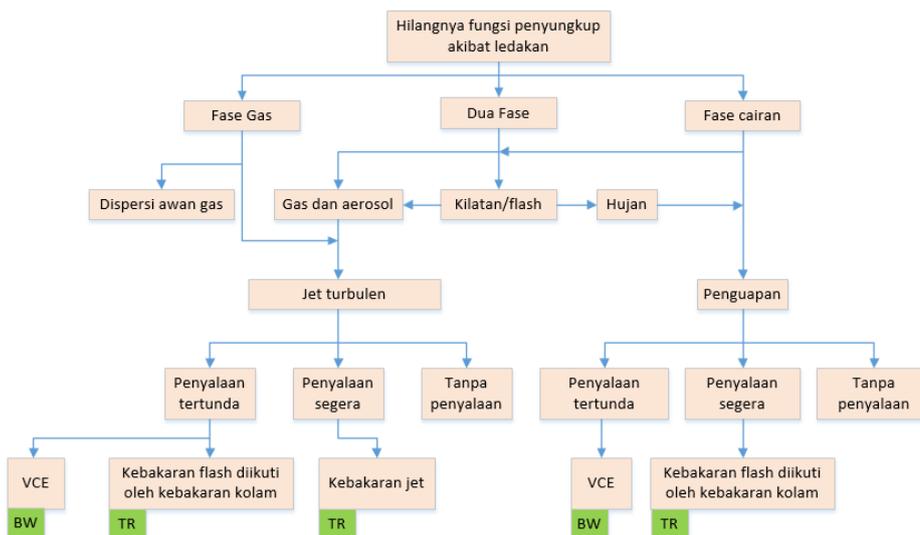
Kejadian ledakan dapat menghasilkan efek seperti tekanan berlebih (*overpressure*), daya dorong (*shockwave*), radiasi panas/termal, serta pecahan (*fragmen*). Diagram logika yang menghubungkan efek ledakan dengan kejadian terlepasnya bahan disajikan dalam Gambar 3, 4 dan 5 [4]. Penentuan skenario ledakan juga dapat dilakukan dengan menggunakan diagram logika tersebut. Sebagai contoh ketika terdapat pelepasan bahan mudah terbakar, dan pengapian terjadi ketika bahan yang terlepas membentuk awan uap, pada keadaan tersebut berpotensi terjadi ledakan awan uap (VCE).



Gambar 3. Digram logika efek ledakan fisik [4].



Gambar 4. Digram logika efek ledakan yang terjadi dalam bejana [4].



Gambar 5. Digram logika efek ledakan dari pelepasan bahan mudah meledak [4].

- BW Gelombang ledakan
- P Projektil
- TR Radiasi panas

## EVALUASI BAHAYA

### Bahaya akibat *overpressure* (tekanan berlebih)

Akibat terjadinya ledakan di sumber bahaya, gelombang tekan menjalar selama ledakan. Besarnya gelombang depan yang menjalar hingga tapak dapat menyebabkan beberapa kerusakan. Kemungkinan individu mengalami kematian pada jarak tertentu dari sumber api akan bergantung pada besarnya intensitas radiasi panas seperti ditunjukkan pada Tabel 1. Respon struktur terhadap gelombang depan yang dihasilkan oleh ledakan dibahas lebih detail pada Buku Panduan yang diterbitkan oleh CCPS tahun 2012 (*Guidelines for Evaluating Process Plant Buildings for External Explosions, Fires, and Toxic Releases*).

Tabel 1 Potensi kerusakan bangunan yang dihasilkan dari besarnya gelombang depan yang hasilkan ledakan [7].

Tekanan berlebih (KPa)	Kerusakan
0.204	Pecahnya jendela besar
0.275	Suara keras. Jendela pecah karena gelombang suara
0.681	Kerusakan panel kecil gelas
2.04	20% jendela mengalami kerusakan. Kerusakan minor struktur rumah
6.8	Kerusakan sebagian rumah, mengakibatkan rumah tidak layak ditempati
13.6	Kerusakan dinding dan atap rumah
13.1-20.4	Kerusakan dinding semen dengan lebar 20-30 cm
16.2	1% gendang telinga mengalami kerusakan
17	Kerusakan 50% bata rumah, distorsi kerangka baja bangunan
20.1-27.7	Pecahnya tangki penyimpanan
34-47.6	Kerusakan sebagian besar rumah
47.7-54.4	Kerusakan dinding bata lebar 20-30 cm
68.9	Kemungkinan kerusakan total bangunan. Mesin dengan berat 3500 kg bergeser dan mengalami kerusakan parah
101	1% kematian karena pendarahan paru-paru
169.2	90% kematian karena pendarahan paru-paru

Tekanan (psig)	Kerusakan karena ledakan
0.1	Pecahnya jendela kecil pada kondisi regangan
0.7	Kerusakan minor terhadap rumah struktur
Zona biru	
1.0	Kerusakan sebagian rumah, mengakibatkan tidak bisa ditempati
2	Kerusakan sebagian dinding dan atap rumah
3	Mesin berat (3000lb) di bangunan industri mengalami kerusakan kecil, kerangka besi bangunan mengalami gangguan
Zona oranye	
4	Kelongsong bangunan industri ringan mengalami kegagalan
5	Bangunan dengan tekanan hidrolik tinggi mengalami sedikit kerusakan
Zona merah	
7	Kereta bermuatan terbalik
10	Kemungkinan bangunan mengalami kerusakan parah, mesin berat (7000 lb) berpindah dan mengalami kerusakan parah
300	Batas <i>crater lip</i>

### **Bahaya Akibat Radiasi Panas, Asap dan Partikulat**

Ledakan yang diikuti dengan kebakaran menghasilkan efek radiasi panas. Intensitas radiasi panas yang cukup tinggi di sekitar tapak akan sangat membahayakan baik bagi struktur bangunan, personil, ataupun peralatan yang berada di instalasi nuklir. Asap dan partikulat sebagai hasil samping kejadian kebakaran apabila masuk ke dalam sistem ventilasi tapak akan mengganggu kegiatan dan keselamatan instalasi nuklir.

### **Bahaya Akibat Proyektil (Fragmen)**

Ketika terjadi ledakan detonasi, sejumlah besar fragmen-fragmen kecil dapat terlontar dari sumber ledakan menuju ke segala arah dengan kecepatan yang cukup tinggi. Fragmen ini dapat terlontar dengan berbagai ukuran dan bentuk. Langkah yang dilakukan untuk mengevaluasi bahaya proyektil ini yakni dengan memprediksi laju awal fragmen pada saat terlontar dari vessel.

### **KESIMPULAN**

Dari kajian di atas dapat disimpulkan bahwa kejadian ledakan yang biasa terjadi di pabrik pemrosesan biasanya disebabkan oleh terlepasnya sejumlah energi dari bahan kimia dapat dikategorikan ke dalam deflagrasi atau detonasi. Identifikasi awal yang perlu dilakukan adalah dengan pendekatan deterministik, langkah selanjutnya adalah penapisan yang dilakukan berdasarkan kebolehjadian terjadinya ledakan, terdapat berbagai rumus perhitungan ledakan yang dapat digunakan untuk analisis seperti yang disebutkan di makalah ini. PET juga harus melakukan skenario berbagai ledakan yang mungkin terjadi, yang kemudian melakukan evaluasi bahaya dari skenario tersebut yang menghasilkan tekanan berlebih, proyektil dan radiasi panas.

### **SARAN**

Untuk pengembangan kajian selanjutnya perlu dikaji nilai kuantitatif dan contoh perhitungan dan pengembangan model penapisan bahaya ledakan.

### **UCAPAN TERIMA KASIH**

Penulis mengucapkan terima kasih banyak kepada jajaran Manajemen P2STPIBN serta tim pengkaji baik dari P2STPIBN maupun dari Fakultas Teknik Kimia ITB yang telah mendukung dan memberikan kesempatan seluas-luasnya kepada penulis untuk melaksanakan kajian ini.

### **DAFTAR PUSTAKA**

1. Republik Indonesia, Keputusan menteri Tenaga Kerja R.I No. KEP. 187/MEN/1999 tentang Pengendalian Bahan Kimia Berbahaya di Tempat Kerja (1999).
2. Crowl, D.A. Louvar, J.F., "Chemical Process Safety, Fundamental with Applications". 3rd ed. Prentice Hall (2011).
3. Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, "Guidelines for Evaluating Plant Buildings for External Explosions and Fires". New York (1996).
4. Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers. "Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis". 2nd ed. New York: A John Wiley & Sons. (2000).
5. Eckhoff, R.K., "Explosion Hazards in the Process Industries" 2nd ed. Elsevier (2016).
6. IAEA NS-G-3.1, "External Human Induced Events in Site Evaluation for Nuclear Power Plants", IAEA, Vienna (2002).
7. Berg, H.-P. Hauschild, J, "Probabilistic Assessment of Nuclear Power Plant Protection Against External Explosions" (2012).
8. Federal Minister for Research and Development. Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke, Phase B, Fachband 4: Einwirkungen von aussen (einschliesslich anlageninterner Brande). Koln: Verlag TUV Rheinland GmbH, (1990).
9. Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, "Guidelines for Evaluating Process Plant Buildings for External Explosions, Fires, and Toxic Releases". 2nd ed. New York: A John Wiley & Sons (2012).
10. Republik Indonesia, Peraturan Kepala BAPETEN No. 6 Tahun 2008 tentang "Evaluasi Tapak Reaktor Daya untuk Aspek Kejadian Eksternal Akibat Ulah Manusia", BAPETEN, Jakarta (2008).

**DISKUSI/TANYA JAWAB**

1. PERTANYAAN :

Bagaimana aspek pencegahan dalam penyimpangan Bahan Mudah Meledak, apakah perlu disampaikan pencegahannya?

JAWABAN :

Terdapat langkah-langkah dalam analisis bahaya yaitu penapisan, identifikasi sumber serta **wawasi rino**. Kalau instalasi **kihua** masuk dalam NSP maka bias dilakukan juga tindakan administrasi yaitu dengan mengurangi kuantitas di sumber bahan peledak itu sendiri.

2. PERTANYAAN :

- a. Deterministik masuk ke dalam NSP, SPL juga masuk bagaimana rekayasanya?
- b. Apakah bisa dilakukan dengan metode TNT dalam kajian ini?

JAWABAN :

- a. Evaluasi rinci perlu dilakukan jika SPL terlewati. Jika efek bahaya tersebut signifikan terhadap instalasi nuklir maka desain dari instalasi nuklir tersebut harus tahan terhadap sumber ledakan tersebut.
- b. Terdapat 3 metode dalam melakukan analisis bahaya ledakan, TNT ekuivalen, TNO, *Modified Baker*. Ketiga metode tersebut dapat digunakan untuk analisis ledakan.

Halaman ini sengaja dikosongkan

## **SISTEM INFORMASI LAJU PAPARAN RADIASI MENGGUNAKAN BORLAND DELPHI 7**

Isti Dian Rachmawati<sup>1</sup>, Muhtadan<sup>2</sup>, Nurhidayat<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Pusat Sains dan Teknologi Akselerator-BATAN, Jl. Babarsari Kotak Pos 6101 ykbb Yogyakarta 55281

<sup>2</sup> Sekolah Tinggi Teknologi Nuklir-BATAN, Jl. Babarsari Kotak Pos 6101 ykbb Yogyakarta 55281

email: istidian@batan.go.id

### **ABSTRAK**

**SISTEM INFORMASI LAJU PAPARAN RADIASI MENGGUNAKAN BORLAND DELPHI 7.** Telah dilakukan pembuatan sistem informasi laju paparan radiasi menggunakan *Borland Delphi 7*. Pemantauan dan pencatatan laju paparan radiasi di ruang penyimpanan kamera gamma masih dilakukan secara manual dengan monitor radiasi. Diperlukan suatu sistem informasi agar data dapat dipantau dan disimpan secara otomatis di personal computer. Data dari monitor radiasi dikirim secara serial menggunakan *PC link USB-ers* ke *personal computer*. Sistem ini merupakan *interface* antara mikrokontroler sebagai monitor laju paparan radiasi dan personal computer sebagai penampil. Program penampil laju paparan radiasi di *personal computer* menggunakan *software Borland Delphi 7*. Data laju paparan ditampilkan dalam bentuk kurva dan disimpan secara otomatis dalam bentuk *logbook*. Hasil pengujian *interface* antara mikrokontroler dengan *personal computer* adalah linier dengan besaran  $R^2 = 0,999$ . Hal ini menunjukkan bahwa sudah terjadi sinkronisasi antara data yang dikirim oleh mikrokontroler dengan data yang diterima oleh *personal computer*.

Kata kunci: sistem informasi, laju paparan, delphi

### **ABSTRACT**

**INFORMATION SYSTEM OF RADIATION EXPOSURE RATE USING BORLAND DELPHI 7.** *Information system of radiation exposure rate using Borland Delphi 7 have been done. Monitoring and recording of radiation exposure rate in gamma camera storage room is still manually by radiation monitor. Required an information system for data can be monitored and stored automatically on personal computer. Data from radiation monitors are transmitted serially via PC link USB-ers to personal computer. This system is an interface between the microcontroller as a monitor rate of exposure to radiation and personal computer as a viewer. The program displaying the rate of radiation exposure on personal computer using Borland Delphi 7 software. The data of exposure rate is shown in curve form and stored automatically in logbook form. The result of interface testing between microcontroller and personal computer is linear with  $R^2 = 0,999$ . This shows that there has been synchronization between data sent by microcontroller with data received by personal computer.*

Keywords: information system, exposure rate, delphi

### **PENDAHULUAN**

Pemanfaatan teknologi nuklir telah banyak dijumpai di berbagai bidang ilmu pengetahuan dan industri. Dalam pemanfaatannya faktor yang paling penting dan harus diutamakan adalah keselamatan dan keamanan dalam melakukan pengendalian energi dan radiasi nuklir yang harus dikuasai dengan baik.[1] Jika keselamatan dan keamanan ini belum dikuasai dengan baik maka akan sangat berbahaya jika terjadi kesalahan prosedur yang dapat menimbulkan dampak buruk bagi manusia maupun lingkungan.[2]

Salah satunya aplikasi teknologi nuklir di bidang industri yaitu penggunaan kamera gamma. Pada saat tidak digunakan, kamera gamma disimpan di dalam ruang penyimpanan yang dilengkapi alat monitor radiasi sehingga laju paparan radiasi di dalam ruangan tersebut selalu terpantau. Pemantauan tersebut dilakukan oleh pengawas dengan mengamati nilai paparan yang terukur pada monitor radiasi secara manual dalam waktu yang periodik, sehingga memiliki potensi kekurangan dalam pemantauan ini antara lain: kesalahan pembacaan monitor radiasi (*human error*), pengamatan yang kurang teratur karena kejenuhan, akses pemantauan yang sulit dan kehilangan dokumentasi. Penggunaan kamera gamma sudah disertai dengan prosedur-prosedur keamanan dan keselamatan. Akan tetapi

karena tingkat stres yang tinggi dan kondisi tubuh pekerja yang letih maka seringkali prosedur tersebut tidak dijalankan sehingga berakibat pada kecelakaan.

Kekurangan tersebut menimbulkan ide tentang perlunya suatu sistem informasi sebagai perangkat monitor laju paparan radiasi pada ruang penyimpanan kamera gamma yang bekerja secara otomatis, sehingga dapat mengurangi kesalahan pembacaan, memperkecil resiko terjadinya kecelakaan, pemantauan menjadi lebih mudah dan dokumentasi lebih teratur.

Dalam penggunaan peralatan radiografi dengan zat radioaktif dan/atau pembangkit radiasi pengion, personil harus melakukan verifikasi keselamatan. Verifikasi keselamatan harus dicatat di dalam *logbook* [3], sehingga dengan adanya permasalahan dan peraturan pemerintah dalam hal pemantauan radiasi ini menjadi latar belakang tentang perlunya dilakukan penelitian tentang "Sistem Informasi Laju Paparan Radiasi Ruang Penyimpanan Kamera Gamma".

Sistem ini akan melakukan pemantauan radiasi secara otomatis oleh *personal computer* untuk memulai maupun menghentikan proses *monitoring* dan untuk menampilkan grafik waktu vs laju paparan serta dokumentasi *logbook*, yang selanjutnya hasil pemantauan dapat disimpan ataupun dicetak.

Penelitian diharapkan dapat memberikan manfaat antara lain memudahkan akses pemantauan laju paparan radiasi di ruang penyimpanan kamera gamma, mengurangi resiko kesalahan pembacaan, memudahkan dalam dokumentasi data laju paparan radiasi, dan mengantisipasi resiko bahaya radiasi dan kecelakaan sehingga keselamatan para operator, pekerja radiasi, masyarakat dan lingkungan kerja lebih terjamin.

## TEORI

### Sistem Informasi

Sistem informasi adalah kombinasi dari manusia, fasilitas atau alat teknologi, media, prosedur dan pengendalian yang bermaksud menata jaringan komunikasi yang penting, proses atas transaksi-transaksi tertentu dan rutin, membantu manajemen dan pemakai intern dan ekstern dan menyediakan dasar pengambilan keputusan yang tepat[4].

Sistem informasi yang dibuat berupa pengiriman data laju paparan radiasi dari mikrokontroler ke *personal computer* melalui antarmuka USB. Data laju paparan radiasi diolah oleh *personal computer* menjadi *logbook* dan kurva laju paparan sehingga dapat disimpan ataupun dicetak.

### PC-Link USBer

PC-Link USBer merupakan sebuah modul USB to UART Converter berbasis FT232BM yang kompatibel dengan USB 1.1 dan USB 2.0 serta UHCI / OHCI / EHCI *host controller*. Modul ini menggunakan amphenol PCB 5x2 untuk antarmuka UART yang kompatibel dengan DT-AVR *Low Cost Series*, DT-51 *Low Cost Series*, dan DT-COMBO AVR-51 Starter Kit.

Modul ini dapat digunakan untuk aplikasi seperti USB to UART RS-232 *converter*, USB to UART RS-422 *converter*, USB to UART RS-485 *converter*, USB modem, antarmuka mikrokontroler dengan USB, dll.[5].

### Bahasa pemrograman mikrokontroler BASCOM AVR

Pemrograman mikrokontroler dilakukan menggunakan compiler *BASCOM AVR*, yaitu compiler yang menggunakan bahasa *BASIC*. *BASCOM AVR* merupakan salah satu bahasa pemrograman yang dapat digunakan untuk membuat program yang akan dimuat dalam mikrokontroler keluarga *AVR*. *BASCOM AVR* merupakan *compiler* yang terintegrasi mulai dari membuat, *men-compile*, *men-debug*, hingga menanamkan file program dapat dilakukan dengan *compiler* ini. File program yang berada pada edit windows dapat di-*compile* dengan memilih menu program kemudian *compile*, jika file berhasil di-*compile* maka *BASCOM AVR* akan menghasilkan file-file lain yang mempunyai nama sama dengan file yang sedang di-*compile* dengan *extension*[6].

### Borland Delphi 7

Delphi adalah salah satu *software* berbasis *visual* yang digunakan untuk membuat program aplikasi pada komputer (seperti *Visual Basic*). Bahasa pemrograman yang

digunakan oleh Delphi sebenarnya merupakan turunan dari bahasa pemrograman pascal, yang dahulu pada Delphi dikenal sebagai objek pascal. Bagi yang telah mengenal bahasa pemrograman pascal, maka mungkin tidak akan terlalu kesulitan dalam mempelajari Delphi.

Delphi relatif lebih mudah dipahami dibandingkan dengan bahasa pemrograman lainnya, disamping itu banyak referensi terutama dalam bentuk buku yang membahas tentang bahasa pemrograman ini. Delphi telah terbukti mampu menghasilkan *software-software* yang berkualitas, baik yang berskala besar maupun kecil, teknologi yang digunakan pada Delphi pun cukup *up to date*. [7]

Sampai saat ini, Borland sebagai perusahaan pembuat Delphi, terus menyempurnakan Delphi mengikuti perkembangan teknologi yang begitu pesat. Hal ini menjadikan Delphi sebagai salah satu pilihan utama yang cukup banyak digunakan oleh para *programmer* di Indonesia khususnya, sebagai *tools* dalam proyek pengembangan *software*. [8]

Versi dari Delphi yang digunakan adalah Borland Delphi versi 7, Delphi 7 merupakan versi yang cukup stabil bila digunakan di Windows 98, 2000, XP, bahkan Vista dibandingkan dengan Delphi versi lainnya [9][10].

### **Komunikasi serial**

Komunikasi serial adalah mengirimkan data secara bergantian sesuai dengan urutan menggunakan sebuah kabel ataupun beberapa kabel. Pada komunikasi serial, data dikirim dari satu titik menuju satu titik yang lain tiap bit dalam satu waktu. [11] Ada 2 macam cara komunikasi data serial yaitu sinkron dan asinkron. Pada komunikasi data serial sinkron, *clock* dikirimkan bersama sama dengan data serial, tetapi *clock* tersebut dibangkitkan sendiri - sendiri baik pada sisi pengirim maupun penerima. Sedangkan pada komunikasi serial asinkron tidak diperlukan *clock* karena data dikirimkan dengan kecepatan tertentu yang sama baik pada pengirim / penerima [12].

### **Logbook paparan radiasi**

Paparan radiasi adalah penyinaran radiasi yang diterima oleh manusia atau materi, baik disengaja atau tidak, yang berasal dari radiasi interna maupun eksterna. [13] *Logbook* paparan radiasi yaitu catatan harian tentang paparan radiasi yang diterima oleh manusia atau materi. Dalam penelitian ini *logbook* digunakan untuk mencatat dan menyimpan data laju paparan radiasi per jam pada ruang penyimpanan kamera gamma.

## **METODOLOGI**

### **Alat yang digunakan**

Peralatan yang digunakan sebagai berikut:

1. Monitor Radiasi Digital
2. *Downloader*
3. *Personal Computer* Dell Inspiron 1464
  - a. *Operating system* : Windows 7 Ultimate 32-bit (6.1, Build 7600)
  - b. *Processor* : Intel(R) Core(TM) i3 CPU
  - c. *Memory* : 2048MB RAM
4. Laboratory DC *Power Supply* ISO-TECH
5. TRIO 15MHz *Oscilloscope* CS-1560A
6. Multimeter SANWA CX506a
7. Tang, Obeng, Solder

### **Bahan-bahan Penelitian**

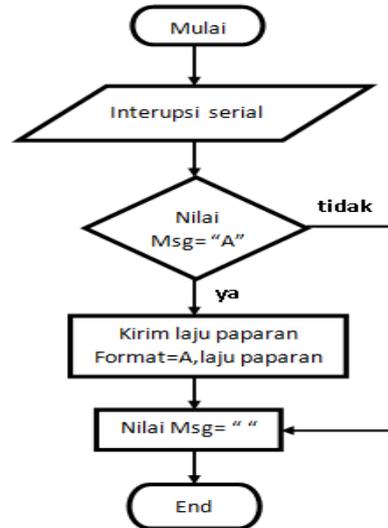
Untuk pelaksanaan semua kegiatan penelitian ini, dibutuhkan beberapa bahan diantaranya sebagai berikut:

1. Kabel
2. Komponen DB9 *Male & Female*
3. PC Link *USB ers*

### **Tata Laksana Penelitian**

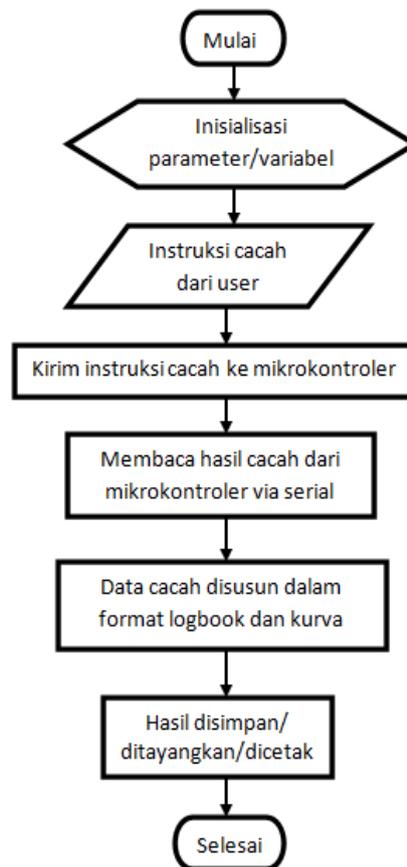
Metode penelitian meliputi:

1. Perancangan program serial mikrokontroler  
Pembuatan program serial mikrokontroler mengikuti alur *flowchart* pada Gambar 1.

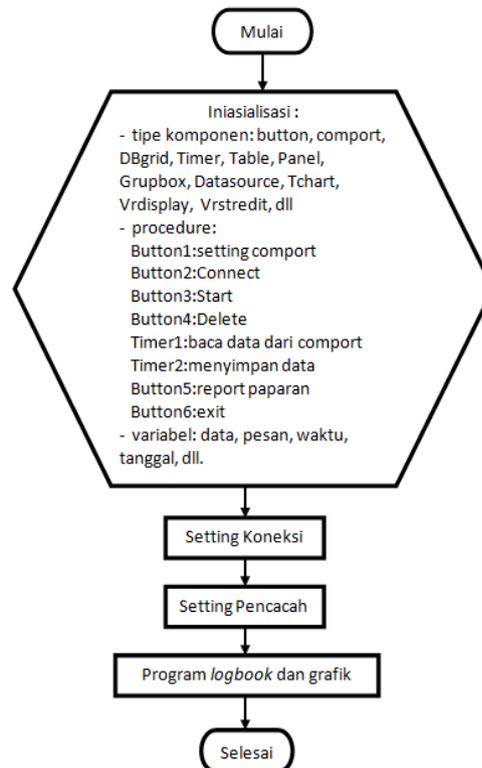


Gambar 1. Flowchart Service Interrupt Urxc

2. Perancangan program Delphi  
Pembuatan program Delphi mengikuti alur *flowchart* program yang disajikan pada Gambar 2 dan 3.



Gambar 2. Flowchart Proses Kerja Perangkat Lunak Delphi



Gambar 3. Flowchart Pembuatan Program Penampil Delphi

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Perancangan program serial mikrokontroler mengikuti alur *flowchart* pada Gambar 1. Program pelayanan interupsi serial sebagai berikut:

```
'interrupt service routine Urxc
'-----
Terima_data:
C = Waitkey()
  Msg = Msg + Chr(c)
  If Msg = "A" Then
    Gosub Kirim_data
    Msg = ""
  End If
  Msg = ""
Return

Kirim_data:
Print ; Msg ; ", " ; Paparan
Return
```

Pengujian program serial mikrokontroler dilakukan dengan mengkoneksikan *port serial* DB9 pada monitor radiasi ke *personal computer* dengan menggunakan PCLink USB-ers. Program di atas merupakan program pelayanan interupsi serial yang dibuat dengan menggunakan *software* BASCOM AVR. Jika mikrokontroler menerima karakter A secara serial dari *personal computer* maka mikrokontroler akan mengirimkan data laju paparan pada saat itu ke *personal computer*. Setelah serial terkoneksi, dirancang program penampil di *personal computer* dengan menggunakan *software* Borland Delphi 7.

Berdasarkan *flowchart* pada Gambar 3, langkah pembuatan program yaitu dimulai dari inialisasi, setting koneksi, setting pencacah, program logbook dan program grafik. Langkah pembuatan program penampil Delphi sebagai berikut:

**Pembuatan program inisialisasi:**

```
unit kirimlngsng;

interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics,
  Controls, Forms,
  Dialogs, CPort, StdCtrls, DB, DBTables, Grids, DBGrids, ExtCtrls,
  jpeg,
  QuickRpt, QRCtrls, TeEngine, Series, TeeProcs, Chart, iComponent,
  iVCLComponent, iCustomComponent, iGradient, VrControls, VrLabel,
  VrDisplay, VrLcd, VrEdit;

type
  TForm1 = class(TForm)
    Button1: TButton;
    Button2: TButton;
    ComPort1: TComPort;
  DataSource1: TDataSource;
  DBGrid1: TDBGrid;
  Table1: TTable;
  Button4: TButton;
  Timer1: TTimer;
  Timer2: TTimer;
  Button3: TButton;
  Edit2: TEdit;
  Button5: TButton;
  Edit1: TEdit;
  Panel2: TPanel;
  Button6: TButton;
  GroupBox1: TGroupBox;
  Chart1: TChart;
  iGradient1: TiGradient;
  GroupBox2: TGroupBox;
  Label2: TLabel;
  Label4: TLabel;
  Series1: TLineSeries;
  Panel3: TPanel;
  Label5: TLabel;
  Panel4: TPanel;
  Label6: TLabel;
  Label7: TLabel;
  GroupBox3: TGroupBox;
  Label3: TLabel;
  GroupBox4: TGroupBox;
  Label1: TLabel;
  iGradient2: TiGradient;
  VrDisplay1: TVrDisplay;
  VrLabel1: TVrLabel;
  VrLabel3: TVrLabel;
  VrStrEdit1: TVrStrEdit;
  procedure Button1Click(Sender: TObject);
  procedure Button2Click(Sender: TObject);
  procedure Button4Click(Sender: TObject);
  procedure Timer1Timer(Sender: TObject);
  procedure Timer2Timer(Sender: TObject);
  procedure Button3Click(Sender: TObject);
  procedure FormCreate(Sender: TObject);
  procedure Button5Click(Sender: TObject);
  procedure Button6Click(Sender: TObject);
```

Program diatas merupakan inialisasi penggunaan variabel panel dan *form* pada *software* Delphi. Program penampil menggunakan 4 *groupbox* antara lain *setting* koneksi, *setting* pencacah, *logbook* dan grafik.

#### **Setting koneksi serial menggunakan *comport***

```
procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);
begin
    comport1.ShowSetupDialog;
end;
procedure TForm1.Button2Click(Sender: TObject);
begin
    if Button2.Caption='&Connect' then
        begin
            button2.Caption:='&Disconnect';
            comport1.Open;
            statusport:=true;
            table1.Active:=true;
        end
    else
        begin
            button2.Caption:='&Connect';
            comport1.Close;
            statusport:=false;
            table1.Active:=false;
        end;
end;
```

Program di atas merupakan program pengaturan koneksi serial di *personal computer*. Pengaturan koneksi yang dipakai adalah *comport*. *Comport* adalah komponen tambahan pada Delphi 7, komponen ini berfungsi sebagai sarana komunikasi data serial antara komputer dengan komputer lain maupun dengan peralatan serial lainnya[12]. Pada penelitian ini *comport* digunakan untuk komunikasi antara *personal computer* dengan mikrokontroler. Program berikutnya yaitu memasukkan data ke tabel *database*:

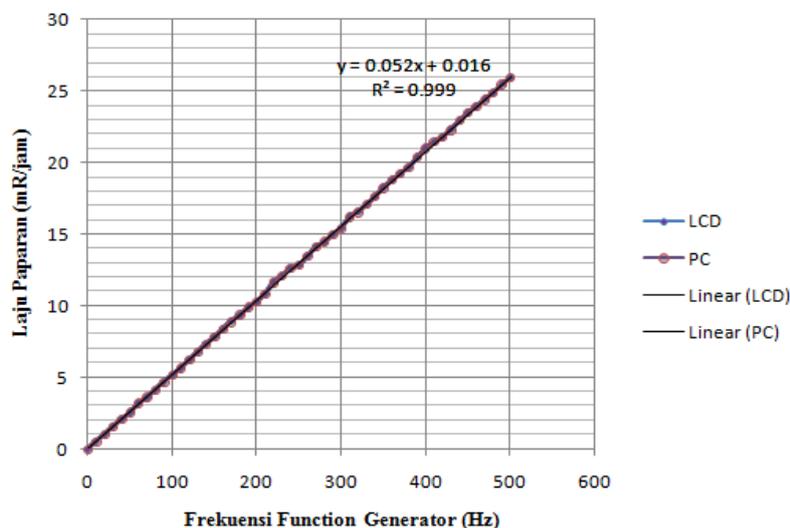
#### **Memasukkan data ke tabel *database***

```
procedure TForm1.Timer2Timer(Sender: TObject);

var datastore:string;
    count:integer;
begin
    i:=ndat;
    ndat:=i;
    ndat:=ndat+1;
    a:=strtoint(edit1.Text);
    if ndat>=a then
        begin
            ndat:=0;
            button3.Caption:='&Start';
            timer1.Enabled:=false;
            timer2.Enabled:=false;
            Label3.Caption:='SISTEM OFF ';
        end;
    comport1.ReadStr(datastore,count);
    table1.Append;
    //memasukkan data
    table1.FieldName('Paparan').AsString:=datastore;
    table1.FieldName('Tanggal').AsDateTime:=Now;
    table1.FieldName('Waktu').AsDateTime:=Time;
    table1.Post;
```

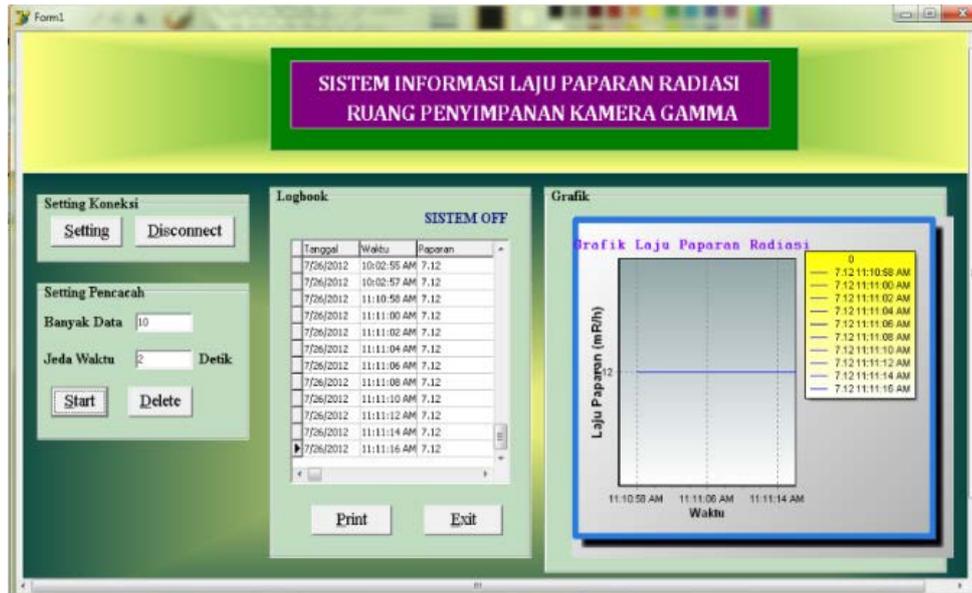
```
end;  
  
procedure TForm1.FormCreate(Sender: TObject);  
var  
    datainterval: cardinal;  
begin  
    pesan:=0;  
    waktu:=0;  
    timer1.Interval:=datainterval*1000;  
    timer2.Interval:=datainterval*1000;  
end;  
  
procedure TForm1.Button5Click(Sender: TObject);  
begin  
    reppapar.Preview;  
end;  
  
procedure TForm1.Button6Click(Sender: TObject);  
begin  
    Application.Terminate;  
end;  
  
end.
```

Program di atas merupakan program untuk memasukkan data ke dalam tabel *database*. *Database* yang digunakan adalah *database desktop* dari Delphi 7. Dari *database desktop* dibuat tabel yang terdiri dari *column* tanggal, waktu, paparan dan ditentukan jenis variabel data dan panjang datanya. Kemudian pada *form* Delphi digunakan *Data Source* (DB) dari *Data Access Lib* dan *Table* dari *BDE lib* untuk memasukkan *database* ke *form* Delphi. Pengujian *interface* dilakukan dengan cara membandingkan tampilan laju paparan di LCD 16x2 dengan tampilan di *personal computer*. Data hasil pengujian *interface* disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Grafik Pengujian *Interface*

Hasil pengujian *interface* antara mikrokontroler dengan *personal computer* adalah linier dengan besaran  $R^2 = 0,999$ . Hal ini menunjukkan bahwa sudah terjadi sinkronisasi antara data yang dikirim oleh mikrokontroler dengan data yang diterima oleh *personal computer*. Hasil tampilan dari sistem informasi di *personal computer* ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Tampilan Interface di Personal Computer

Proses kerjanya yaitu pada tombol *setting* diisikan *port* serial yang dipakai lalu klik *connect*. Kemudian masukkan berapa data yang diinginkan dan atur jeda waktu. Saat tombol *start* diklik, *database* akan mulai bekerja berdasarkan pengaturan di *setting* pencacah dan juga ditampilkan dalam bentuk grafik. Ketika diklik tombol *print* maka data *logbook* dapat langsung dicetak, tampilannya pada Gambar 6.

DATA LAJU PAPARAN RADIASI		
TANGGAL	WAKTU	PAPARAN (mR/jam)
7/25/2012	2:50:18 PM	0.00
7/25/2012	2:50:22 PM	0.00
7/25/2012	2:50:24 PM	0.00
7/25/2012	2:50:27 PM	0.00
7/25/2012	2:51:30 PM	0.00
7/25/2012	2:51:34 PM	0.00
7/25/2012	2:52:48 PM	0.00
7/25/2012	2:52:54 PM	0.00
7/25/2012	2:53:58 PM	0.00
7/26/2012	9:43:55 AM	0.00
7/26/2012	9:43:57 AM	0.00
7/26/2012	9:43:59 AM	0.00
7/26/2012	9:44:01 AM	0.00
7/26/2012	9:44:03 AM	0.00
7/26/2012	9:44:05 AM	0.00
7/26/2012	9:44:07 AM	0.00
7/26/2012	9:44:09 AM	0.00
7/26/2012	9:44:11 AM	0.00
7/26/2012	9:44:13 AM	0.00
7/26/2012	9:48:03 AM	0.00
7/26/2012	9:48:05 AM	0.00
7/26/2012	9:48:07 AM	0.00
7/26/2012	9:48:09 AM	0.00
7/26/2012	9:48:11 AM	0.00
7/26/2012	9:48:13 AM	0.00
7/26/2012	9:48:15 AM	0.00
7/26/2012	9:48:17 AM	0.00
7/26/2012	9:48:19 AM	0.00
7/26/2012	9:48:21 AM	0.00
7/26/2012	9:59:21 AM	7.18
7/26/2012	9:59:23 AM	7.12
7/26/2012	9:59:25 AM	7.12
7/26/2012	9:59:27 AM	7.12

Gambar 6. Tampilan Logbook Laju Paparan Radiasi yang Dicetak

Dari gambar 6 dapat dilihat hasil tampilan *logbook* berupa tanggal, waktu, dan data laju paparan radiasi dengan satuan mR/jam.

## KESIMPULAN

Telah berhasil dibuat sistem informasi laju paparan radiasi ruang penyimpanan kamera gamma yang dilengkapi dengan unit kalibrator dan fasilitas *interface serial*. Pengujian *interface* antara mikrokontroler dengan *personal computer* adalah linier dengan besaran  $R^2 = 0,999$  sehingga sudah terjadi sinkronisasi antara data yang dikirim oleh mikrokontroler dengan data yang diterima oleh *personal computer*. Sistem informasi yang dihasilkan pada *personal computer* berupa *logbook* data yang dapat langsung dicetak dan grafik.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Adi Abimanyu, M.Eng atas bantuan teknisnya.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] WISNU ARYA WARDHANA, "Teknologi Nuklir Proteksi Radiasi dan Aplikasinya". Yogyakarta. 2007. Penerbit ANDI.
- [2] WISNU ARYA WARDHANA "Radioekologi", Yogyakarta. 1996. Penerbit ANDI.
- [3] BAPETEN. Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 7 Tahun 2009 tentang Keselamatan Radiasi dalam Penggunaan Peralatan Radiografi Industri Pasal 42. 2009.
- [4] JOHN F. NASH. *Pengertian Sistem Informasi* [Online]. <http://ridwaniskandar.files.wordpress.com/2009/05/52-pengertian-sistem-informasi.pdf/>. 1995. [Diakses pada 7 Mei 2018].
- [5] ANONIM. Datasheet *PC-Link USBer* [Online]. [www.innovativeelectronic.com](http://www.innovativeelectronic.com). 2009. [Diakses pada 7 Mei 2018].
- [6] AGFIANTO EKO PUTRA. Tip dan Trik Mikrokontroler AT89 dan AVR Tingkat Pemula Hingga Lanjut. 2010. Gava Media.
- [7] FUQIANG ZHANG. *SUPER-STATE: A Computer Program for the Control of Operant Behavioral Experimentation*. *Journal of Neuroscience Methods*. Volume 155, Issue 2, 15 September 2006, Pages 194-201.
- [8] PAUL F. McCOMBIE, JIM PENMAN. *The Production of Interactive Engineering Design Software Using Borland Delphi*. *Advances in Engineering Software*. Volume 32, Issues 10-11, October-November 2001, Pages 789-796.
- [9] MUKHLASIN, H. *Panduan Belajar Bahasa Pemrograman Delphi untuk Pemula*. 2008.
- [10] MUHTADAN & ABIMANYU, A. *Pemrograman Microcontroller AVR dengan Bascom AVR*, Yogyakarta. 2010. Badan Tenaga Nuklir Nasional.
- [11] MUJAHIDIN 2006. *Pemrograman Port Serial*. [Online]. <http://www.iddhien.com/> [Diakses pada 8 Mei 2018]
- [12] BAPETEN. Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 8 Tentang Keselamatan Radiasi dalam Penggunaan Pesawat Sinar-X Radiologi Diagnostik dan Intervensional. 2011.
- [13] SANJAYA, T. A. 2007. Instalasi Comport pada Delphi 7. <http://taufikadisanjaya.blogspot.com/> [Accessed 15 Mei 2018].

## DISKUSI/TANYA JAWAB

### 1. PERTANYAAN :

Bagaimana cara memvalidasi sistem informasi laju paparan ini?

### JAWABAN :

Cara memvalidasi sistem informasi dapat dilakukan dengan cara:

1. Perhitungan stabilitas pencacah (chr square test)
2. Membandingkan antara tampilan LCD di monitor radiasi dengan tampilan program Delphi
3. Dapat dilakukan simulasi pengukuran sumber gamma.

## TINGKAT RADIOAKTIVITAS GROSS BETA DAN $^{137}\text{Cs}$ DALAM AIR HUJAN DI KAWASAN NUKLIR SERPONG

Leli Nirwani, R. Buchari, Wahyudi, Mujiwiyono dan June Mellawati

Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi – BATAN

Jl.Lebak Bulus Raya No.49, Cilandak, Jakarta Selatan

leli\_n@batan.go.id

### ABSTRAK

**TINGKAT RADIOAKTIVITAS GROSS BETA DAN  $^{137}\text{Cs}$  DALAM AIR HUJAN DI KAWASAN NUKLIR SERPONG.** Sebagian penduduk di sekitar kawasan nuklir serpong masih memanfaatkan air hujan untuk berbagai keperluan, yaitu pertanian, peternakan, perikanan, dan rumahtangga (jamban). Radionuklida pemancar beta dan  $^{137}\text{Cs}$  termasuk unsur radioaktif lepasan dari kegiatan instalasi nuklir, seperti Pusat Reaktor Serbaguna di Serpong, sehingga radionuklida tersebut dikategorikan polutan radioaktif. Berdasarkan hal ini telah dilakukan pengukuran radioaktivitas gross beta dan  $^{137}\text{Cs}$  dalam air hujan terkait dengan aspek keselamatan lingkungan dan penyusunan data base rona awal kawasan Serpong. Tujuan penelitian adalah untuk memperoleh data status terkini dari polutan radioaktif pemancar beta dan  $^{137}\text{Cs}$  di air hujan yang diduga berasal dari kawasan nuklir Serpong selama periode 2007-2016. Metode penelitian meliputi pengumpulan data sekunder pengguna air hujan di wilayah kajian, serta data primer konsentrasi polutan radioaktif pemancar beta dan  $^{137}\text{Cs}$ . Pengambilan sampel air hujan dilakukan secara terus menerus setiap bulan sejak tahun 2007 hingga 2016, dan kegiatannya meliputi preparasi sampel secara prekonsentrasi, selanjutnya analisis secara spektrometri gamma. Radionuklida pemancar beta diukur sebagai gross beta sedangkan unsur radioaktif  $^{137}\text{Cs}$  diukur pada energi spesifik 661,6 keV. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa tingkat radioaktivitas gross beta berkisar 0,0135 – 0,4882 Bq/l, sedangkan radioaktivitas  $^{137}\text{Cs}$  berkisar < 2,10 – 132,10 Bq/m<sup>3</sup>. Nilai ini masih berada di bawah ambang batas tingkat radioaktivitas lingkungan yang diijinkan Menkes RI (1990) untuk air bersih, yaitu gross beta 1000 Bq/l, sedangkan  $^{137}\text{Cs}$ : 260 (Bq/m<sup>3</sup>) menurut Bapeten (2017), sehingga dikategorikan masih relatif aman untuk digunakan.

**Kata kunci:** radioaktivitas gross beta,  $^{137}\text{Cs}$ , spektrometri gamma, air hujan

### ABSTRACT

**RADIOACTIVITY LEVEL OF GROSS BETA AND Cs-137 IN RAINWATER IN SERPONG NUCLEAR AREAS.** Some residents around the serpong nuclear area still use rainwater for various purposes, namely agriculture, livestock, fisheries, and households (toilet). Beta-emitting radionuclides and  $^{137}\text{Cs}$  are included as removable radioactive elements from nuclear installation activities, such as the Multipurpose Reactor Center in Serpong, so that they are categorized as radioactive pollutants. Based on mentioned above, measurements of gross beta and  $^{137}\text{Cs}$  radioactivity in rainwater were measured in relation to environmental safety aspects and preparation of the initial baseline data for the Serpong area. The aim of the study was to obtain the current status data of beta emitters radioactive pollutant and  $^{137}\text{Cs}$  in rainwater which was suspected from the Serpong nuclear area during the period year 2007-2016. The research method includes collecting secondary data on rainwater users (resident) in the study area as well as primary data on radioactive pollutant concentration of beta transmitters and  $^{137}\text{Cs}$ . Rainwater sampling was carried out continuously every month from 2007 to 2016, and its activities include preconcentration sample preparation, then gamma spectrometric analysis. Radionuclide beta transmitter was measured as gross beta while the radioactive element  $^{137}\text{Cs}$  was measured at a specific energy of 661.6 keV. The measurement results show that the level of gross beta radioactivity ranged 0,0135 – 0,4882 Bq/l, while the radioactivity of  $^{137}\text{Cs}$  ranged <2.10 - 132.10 Bq/m<sup>3</sup>. This value is still below the threshold level of environmental radioactivity permitted by the Indonesian Minister of Health (19900) for clean water, ie gross beta 1000 Bq/l, while  $^{137}\text{Cs}$  260 Bq/m<sup>3</sup> according to Bapeten (2017), so categorized as still relatively safe to use.

**Key words:** gross beta radioactivity,  $^{137}\text{Cs}$ , gamma spectrometry, rainwater

### PENDAHULUAN

Pada saat musim kemarau, masyarakat di sekitar Serpong kesulitan memperoleh air bersih sehingga sebagian dari mereka masih memanfaatkan air hujan untuk memenuhi

berbagai kebutuhan sehari-harinya(1). Berdasarkan hasil pemantauan BMKG dan P3KL2 Serpong, nilai pH air hujan yang terpantau di wilayah Serpong selama periode 2000-2015 berkisar 4,59 – 5,15, dan nilai ini di bawah batas pH air hujan normal (pH 5,6) sehingga air hujan di daerah tersebut dikategorikan masih aman untuk dimanfaatkan(2).

Air hujan adalah air yang menguap karena panas melalui proses kondensasi membentuk tetes air yang lebih besar kemudian jatuh kembali ke permukaan bumi. Pada waktu berbentuk uap air terjadi proses transportasi (pengangkutan uap air oleh angin menuju daerah tertentu yang akan terjadi hujan). Ketika proses transportasi, uap air tercampur dan melarutkan gas-gas yang ada di udara, oleh sebab itu air hujan mengandung debu, bakteri, serta berbagai senyawa polutan yang terdapat dalam udara sehingga kualitasnya banyak dipengaruhi oleh keadaan lingkungannya. Pemanfaatan air hujan dapat memecahkan permasalahan kekurangan air cukup nyata, dan data menunjukkan bahwa penggunaan air hujan dapat memenuhi kebutuhan dalam rumah tangga hingga lebih dari 50% permintaan air. Kesadaran masyarakat tentang penggunaan air hujan untuk memenuhi kebutuhan air adalah dua aspek penting dalam konservasi air (3).

Pada kondisi operasi normal maupun abnormal (kasus kecelakaan), kegiatan fasilitas nuklir berpotensi melepaskan sejumlah polutan radioaktif ke lingkungan. Beberapa jenis unsur radioaktif lepasan dari PLTN tipe PWR, yaitu gas mulia (isotop-isotop Xe dan Kr), tritium ( $\text{H}3$ ), karbon ( $\text{C}14$ ), iodium (isotop-isotopnya) dalam efluen gas, serta tritium ( $\text{H}3$ ) dan selainnya ( $\text{Mn}54$ ,  $\text{Co}60$ ,  $\text{Fe}59$ ,  $\text{Cs}137$ , dll.) dalam efluen cair, dan partikulat yang merupakan hasil fisi dan aktivasi pemancar beta dan gamma (4). Unsur radioaktif pemancar alfa, beta maupun gamma, diantaranya yaitu  $\text{Cs}-137$  tersebut merupakan lepasan dari kegiatan fasilitas nuklir yang melalui udara (air hujan) dapat terdeposisi ke tanah. Beberapa jenis unsur radioaktif lepasan dari PLTN tipe PWR Korea, Jepang, Mediterania Timur dan Timur Tengah, yaitu beberapa unsur radioaktif pemancar beta dan gamma yang diantaranya yaitu  $\text{Cs}-137$  hasil fisi maupun aktivasi pemancar beta dan gamma (5,6). Badan regulasi nuklir di Indonesia (BAPETEN) mengatur tentang nilai batas radioaktivitas lingkungan (alpha, beta dan gamma) yang meliputi(i) nilai batas lepasan radioaktivitas ke lingkungan, (ii) baku tingkat radioaktivitas di lingkungan, sedangkan Kementerian Kesehatan Republik Indonesia mengatur tentang tingkat radioaktivitas alfa dan beta untuk persyaratan air bersih(7,8). Berdasar pernyataan ini penting dilakukan pemantauan radioaktivitas gros beta dan  $\text{Cs}-137$  di materi lingkungan, diantaranya yaitu air hujan terkait dengan potensi pemanfaatan air hujan untuk berbagai keperluan pada saat musim kering (kemarau). Melalui *food web* (rantai pangan), secara tidak langsung unsur radioaktif yang terkandung dalam air hujan tersebut dapat masuk ke dalam tubuh manusia. Radionuklida yang terdeposisi di tanah pun berpotensi terserap oleh tanaman melalui *food web* yang akan sampai ke manusia.

Radionuklida  $^{137}\text{Cs}$  memancarkan radiasi gamma pada energi 661,66 keV dengan kelimpahan 0,85, mempunyai waktu paro fisik 30 tahun. Radiotoksitasitas  $^{137}\text{Cs}$  dikategorikan termasuk dalam kategori toksisitas sedang, dan di dalam tubuh bersifat hampir sama dengan unsur Kalium (K) dengan waktu paro biologi  $^{137}\text{Cs}$  110 hari. Radionuklida  $^{137}\text{Cs}$  ini bersifat mudah larut dan mudah diserap oleh saluran pencernaan dan akan didistribusikan merata ke seluruh tubuh. Sebagian besar (80%)  $^{137}\text{Cs}$  yang terserap akan mengendap pada bagian otot tubuh, sedang sebagian kecil (8%) akan mengendap di tulang(9,10). Radioaktivitas gross beta merupakan hasil pengukuran campuran radionuklida pemancar beta, seperti isotop-isotop kalium, tritium, karbon, gas nobel terlarut, Iodium, antimon, stronsium dan lain sebagainya(5,6).

Tujuan penelitian adalah memperoleh data tingkat radioaktivitas gros beta dan  $^{137}\text{Cs}$  yang tergolong polutan radioaktif untuk mengetahui status terkini air hujan yang akan terdeposisi ke dalam tanah. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan data rona awal tingkat radioaktivitas dari radionuklida gross beta dan  $^{137}\text{Cs}$  terkait keberadaan instalasi nuklir PRSG-BATAN dan juga sebagai data rona awal untuk penyusunan dokumen amdal pembangunan RDE (Reaktor Daya Eksperimental).

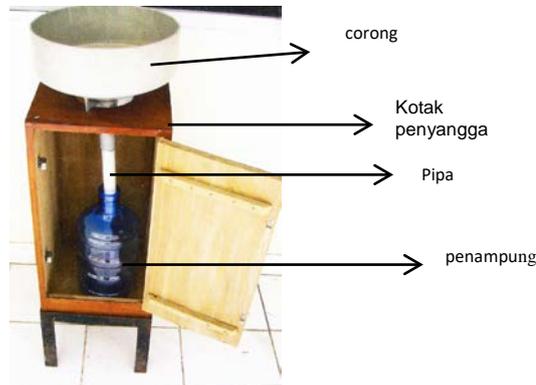
## METODOLOGI PENELITIAN

### Tempat dan Waktu

Penelitian dilakukan di PTKMR Pasar Jumat, yaitu preparasi, pengukuran dan analisis sampel. Pengambilan sampel air hujan dilakukan di beberapa tempat di kawasan Serpong setiap bulan pada tahun 2007 sampai 2016.

**Peralatan**

Pada penelitian digunakan peralatan sampling air hujan (Gambar 1), peralatan gelas, yaitu gelas beker, gelas ukur dan batang pengaduk karet, alat pengering sampel *hot plate* dan lampu IR, wadah sampel plancet dan wadah Marinelli. Peralatan penunjang lainnya, yaitu label, spidol, dll. Peralatan untuk mengukur dan menganalisis <sup>137</sup>Cs adalah Spektrometer Gamma yang dilengkapi detektor HPGe dan perangkat lunak Maestro. Alat untuk mengukur dan menganalisis gross beta menggunakan LBC (*Low Background Counter*) Merk Packard.



**Gambar 1. Perangkat Penampung Sampel Air Hujan**

**Prosedur Kerja**

Tahapan kegiatan meliputi pengambilan sampel, preparasi, pengukuran, analisis, perhitungan konsentrasi, yang dapat dijelaskan seperti berikut ini.

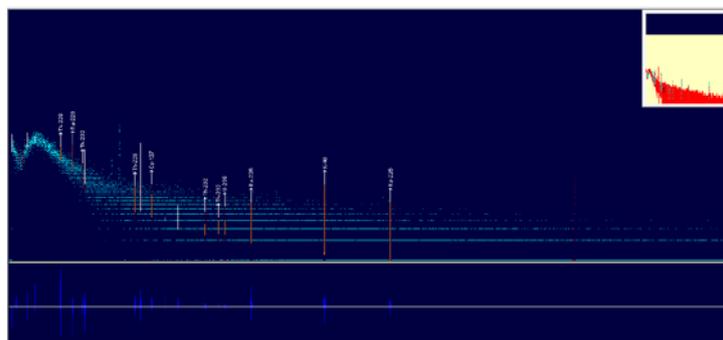
Pengambilan sampel air hujan dilakukan dengan cara air hujan dikumpulkan menggunakan perangkat alat penampung air hujan (Gambar 1). Air hujan tersebut ditampung selama satu bulan ke dalam jerigen yang sudah diberi label, dan selanjutnya dibawa ke laboratorium untuk dilakukan preparasi lebih lanjut.

Preparasi sampel untuk pengukuran radioaktivitas <sup>137</sup>Cs dilakukan dengan cara sampel air hujan dalam jerigen (volume 10-20 l) dituang beberapa kali ke dalam *beaker glass* sambil diuapkan di atas *hot plate* menjadi volume 1 L. Selanjutnya sampel air hujan sebanyak 1 L tersebut dipindahkan ke dalam wadah Marinelli (polietilen), ditutup/*sealed* (Gambar 2), dan siap diukur menggunakan Spektrometer Gamma.

Pengukuran tingkat radioaktivitas <sup>137</sup>Cs menggunakan Spektrometer Gamma dengan cara sampel air hujan dalam wadah Marinelli diletakkan di atas detektor HP Ge Spektrometer Gamma dan dicacah selama 1 hari. Pengukuran dilakukan pada energi gamma spesifiknya, yaitu 661,6 keV (Gambar 3).



**Gambar 2. Sampel air hujan dalam Marinelli**



**Gambar 3. Spektrum <sup>137</sup>Cs Dalam Sampel Air Hujan**

Perhitungan Konsentrasi <sup>137</sup>Cs dalam air hujan menggunakan rumus persamaan berikut:

$$: C_{avg} = \frac{n_s - n_B}{\epsilon_\gamma \cdot P_\gamma \cdot W_{Sp}} \dots\dots\dots(1)$$

dengan :

$n_s$  : laju cacah sampel (cps)

$n_B$  : laju cacah latar (cps)

$n_s$  : efisiensi pada energi gamma teramati (%)  
 $p_\gamma$  : *yield* dari energi gamma teramati (%)  
 $w_{sp}$ : volume sampel (L)

Konsentrasi minimum yang dapat dideteksi (*MDC*) untuk suatu sistem spektrometer gamma dipengaruhi oleh efisiensi pencacahan, cacah latar dan berat sampel. Untuk menghitung *MDC* dengan tingkat kepercayaan 68% ditentukan dengan persamaan berikut.

$$MDC = 2,33 \cdot \frac{\sqrt{\frac{n_B}{t_B}}}{\epsilon_\gamma \cdot p_\gamma \cdot w_{Sp}} \dots\dots\dots(2)$$

dengan:

*MDC* : konsentrasi minimum yang dapat dideteksi (Bq/m<sup>3</sup>)  
 $n_B$  : laju cacah latar (cps)  
 $t_B$  : waktu cacah latar (detik)  
 $\epsilon_\gamma$  : efisiensi pada energi gamma teramati (%)  
 $p_\gamma$  : *yield* dari energi gamma teramati (%)  
 $w_{Sp}$  : volume sampel air hujan (l)

Preparasi sampel untuk pengukuran radioaktivitas gross beta dilakukan dengan cara 1 l sampel air hujan dituang ke dalam *beaker glass* sambil diuapkan di atas *hot plate* hingga menjadi volume  $\pm 2$  ml. Selanjutnya sampel tersebut dipindahkan ke dalam plancet sambil dikeringkan di bawah lampu IR hingga kering (Gambar 4). Sampel air hujan yang sudah kering disimpan ke dalam desikator dan siap untuk diukur dengan LBC (Gambar 5).



**Gambar 4. Preparasi Sampel Air Hujan Untuk Pengukuran Gross Beta Dengan LBC**



**Gambar 5. Instrumentasi LBC**

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

**Data Penduduk Di Sekitar Kawasan Nuklir Serpong Pengguna Air hujan**

Seperti diketahui sebagian penduduk sekitar kawasan nuklir Serpong masih memanfaatkan air hujan untuk berbagai keperluan dan data ditunjukkan pada Tabel 1 berikut:

Tabel 1. Data Jumlah Penduduk yang Masih Menggunakan Air Hujan Untuk Berbagai Keperluan(11).

No.	Nama Lokasi Penduduk	Jumlah Penduduk (%)	Kegiatan
1	Kecamatan Serpong, Kelurahan Muncul	0,45	Jamban
2	Kecamatan Gunung Sindur, Kelurahan Gunung Sindur	0,31	Jamban
3	Kecamatan Setu, Kelurahan Muncul	22,62	Peternakan
4	Kecamatan Setu, Kelurahan Kranggan	0,61	Peternakan
5	Kecamatan Cisauk, Kelurahan Cibogo	5,45	Peternakan
6	Kecamatan Setu, Kelurahan Muncul	25,53	Perikanan
7	Kecamatan Setu, Kelurahan Kranggan	11,59	Perikanan
8	Kecamatan Setu, Kelurahan Muncul	23,08	Pertanian
9	Kecamatan Setu, Kelurahan Kranggan	1,83	Pertanian
10	Kecamatan Setu, Kelurahan Babakan	5,06	Pertanian
11	Kecamatan Cisauk, Kelurahan Suradita	1,15	Pertanian

12	Kecamatan Cisauk, Kelurahan Suradita	3,23	Pertanian
13	Kecamatan Cisauk, Kelurahan Cibogo	2,18	Pertanian
14	Kecamatan Rumpin, Kelurahan Sukamulya	0,54	Pertanian

### Tingkat Radioaktivitas Gross Beta Dalam Air Hujan

Hasil pengukuran dan analisis radionuklida pemancar beta dalam sampel air hujan di kawasan Serpong selama periode tahun 2007 – 2016 sangat bervariasi (Tabel 2).

**Tabel 2. Tingkat Radioaktivitas Gross Beta dalam Air Hujan Kawasan Nuklir Serpong, Periode Tahun 2007 – 2016 (Bq/l)**

Sampel Bulan	Tingkat Radioaktivitas Gross Beta (Bq/l)									
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Jan.	-	< MDC	0,0297	0.1999						
Feb.	-	< MDC	0,0230							
Maret	-	< MDC	< MDC	0,0873	< MDC	0,2747	< MDC	< MDC	= MDC	< MDC
April	-	< MDC	< MDC	0,2777	< MDC	< MDC	< MDC	< MDC	= MDC	0,0570
Mei	-	< MDC	0,0519	0,2406						
Juni	-	< MDC	< MDC	< MDC	< MDC	0,2747	< MDC	< MDC	0,0383	0,0180
Juli	-	< MDC	0,0419	0,0624						
Agust	-	< MDC	-	< MDC	-	-	0.1300	< MDC	-	0,0135
Sept.	< MDC	< MDC	< MDC	< MDC	-	0.3867	< MDC	< MDC	0,0546	0,0185
Okt.	< MDC	< MDC	< MDC	< MDC	-	-	< MDC	< MDC	-	0,0194
Nov.	< MDC	< MDC	< MDC	< MDC	< MDC	< MDC	-	< MDC	0,0352	< MDC
Des.	< MDC	< MDC	< MDC	< MDC	-	< MDC	< MDC	< MDC	0,0261	0,0261
MDC rerata =	1,9360	1,9360	0.4882	0.0553	0.0553	0.0549	0.0549	0.0571	0.0216	0.0119

Keterangan: - = Sampel tidak ada dan atau kering, MDC (*Minimum Detectable Concentration*) = Konsentrasi terkecil yang dapat terukur

Pada Tabel 2 terlihat bahwa hasil pengukuran rata-rata nilai batas terkecil (MDC) gross beta yang dapat terukur dengan LBC sangat bervariasi dari tahun ke tahun, yaitu 0,0119 – 1,9360 Bq/l. Namun demikian hasil pengukuran gross beta di sampel air hujan di beberapa kawasan menunjukkan masih di bawah batas ukur (MDC), artinya relatif sangat rendah bahkan tidak terdeteksi. Di beberapa kawasan ditemukan radioaktivitas gross beta berkisar 0,0135-0,3867 Bq/l. Hal ini menunjukkan bahwa perkiraan jatuhnya radioaktif pemancar beta melalui air hujan selama periode tahun 2007 – 2016 dari kegiatan instalasi nuklir Reaktor Serba Guna tidak terbukti. Berdasarkan data ini tingkat radioaktivitas lingkungan air hujan di Serpong sepanjang tahun 2007 – 2016 terbebas dari kontaminan atau jatuhnya polutan radioaktif. Dibandingkan dengan nilai gross beta yang disyaratkan Kementerian Kesehatan untuk air bersih (1990), yaitu 1000 Bq/l, air hujan dari kawasan Serpong masih dikategorikan bersih dan masih memenuhi syarat untuk dapat digunakan(8). Tingkat radioaktivitas gross beta di air hujan yang disampling di sekitar fasilitas nuklir di Korea mempunyai tren konstan, namun meningkat di musim dingin dan hampir 5 kali lipatnya. Penyebab kecenderungan itu memberikan informasi bahwa ada korelasi antara musim dengan konsentrasi radioaktivitas gross beta(12).

### Tingkat Radioaktivitas $^{137}\text{Cs}$ dalam Air Hujan

Hasil pengukuran dan analisis  $^{137}\text{Cs}$  dalam sampel air hujan dari kawasan Serpong selama periode tahun 2007 – 2016 tercantum dalam Tabel 3 berikut ini.

**Tabel 3. Hasil Pengukuran rerata Cs-137 dalam Air Hujan di Kawasan Nuklir Serpong Selama Tahun 2007 – 2016**

Sampel Bulan	Konsentrasi (Bq/m <sup>3</sup> )									
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Jan.	-	< MDC	< MDC	< MDC	< MDC	< MDC	10,4	<MDC	<MDC	<MDC
Feb.	-	< MDC	< MDC	< MDC	< MDC	< MDC	6.4	< MDC	0,70	< MDC
Maret	-	< MDC	< MDC	< MDC	< MDC	< MDC	< MDC	< MDC	<MDC	< MDC
April	-	-	< MDC	< MDC	< MDC	< MDC	< MDC	< MDC	<MDC	< MDC
Mei	-	3,50	< MDC	< MDC	< MDC	< MDC	< MDC	< MDC	<MDC	< MDC
Juni	-	< MDC	< MDC	< MDC	< MDC	< MDC	< MDC	< MDC	<MDC	< MDC
Juli	-	-	< MDC	< MDC	< MDC	< MDC	-	< MDC	<MDC	< MDC
Agust	-	< MDC	-	< MDC	-	< MDC	-	< MDC	-	< MDC
Sept.	2,10	<b>40,0</b>	10,00	< MDC	< MDC	< MDC	< MDC	< MDC	<b>37,40</b>	< MDC
Okt.	< MDC	< MDC	< MDC	< MDC	< MDC	-	2,7	4,7	-	< MDC
Nov.	< MDC	< MDC	< MDC	< MDC	< MDC	< MDC	-	< MDC	<MDC	-
Des.	< MDC	< MDC	< MDC	< MDC	< MDC	< MDC	18,5	< MDC	<MDC	< MDC
MDC	2,10	2,10	2,10	132,1	132,10	132,10	132,10	0,40	0,40	0.30
rerata =										

Keterangan: - = Sampel tidak ada dan atau kering, MDC (*Minimum Detectable Concentration*) = Konsentrasi terkecil yang dapat terukur

Pada Tabel 3 terlihat bahwa hasil pengukuran rata-rata nilai batas terkecil (MDC)  $^{137}\text{Cs}$  yang dapat terukur dengan spektrometer gamma sangat bervariasi dari tahun ke tahun, yaitu 0,30 – 132,10 Bq/m<sup>3</sup>. Namun demikian hasil pengukuran radioaktivitas  $^{137}\text{Cs}$  di sampel air hujan di beberapa kawasan menunjukkan di bawah batas ukur, artinya relatif sangat rendah dan bahkan tidak terdeteksi. Konsentrasi  $^{137}\text{Cs}$  tertinggi (40 Bq/l) ditemukan dalam sampel air hujan yang diukur pada bulan agustus-September tahun 2008 dan 2015, sedangkan terendah (tidak terdeteksi atau < MDC (ditemukan pada tahun 2007, 2012 dan 2014) (2008) tertinggi 40 Bq/m<sup>3</sup>. Dalam Peraturan Kepala BAPETEN No.07 Tahun 2017 dinyatakan bahwa nilai batas radioaktivitas  $^{137}\text{Cs}$  di lingkungan yang diizinkan adalah 260 Bq/m<sup>3</sup>, dan berdasarkan pernyataan tersebut, polutan radioaktif  $^{137}\text{Cs}$  dalam air hujan yang terdeteksi di kawasan Serpong periode tahun 2007-2016 tidak terkontaminasi  $^{137}\text{Cs}$  dan masih aman untuk dimanfaatkan.

### KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa: (i) tingkat radioaktivitas gross beta dalam sampel air hujan dari kawasan Serpong relatif sangat rendah, yaitu dari tidak terdeteksi hingga di bawah nilai MDC, (ii) tingkat radioaktivitas  $^{137}\text{Cs}$  dalam sampel air hujan dari kawasan Serpong juga masih relatif rendah karena lebih rendah dari persyaratan BAPETEN (2017) dan di bawah nilai MDC. Berdasarkan hal ini, air hujan dari kawasan Serpong masih memenuhi persyaratan BAPETEN untuk kandungan unsur radioaktifnya ( $^{137}\text{Cs}$ ) dan persyaratan Kementerian Kesehatan untuk tingkat radioaktivitas gross beta.

### DAFTAR PUSTAKA

1. REPUBLIKA. "Air Dicari Hujan Dinanti". Rabu 4 November 2015. **Error! Hyperlink reference not valid.** koran/urbana/15/ 11/04/nxa9086-air-dicari-hujan-dinanti. Diunduh Juni 2017.
2. KEMENLH & KEHUTANAN. Fenomena deposisi asam di wilayah Jakarta dan Serpong. Puslitbang Kualitas dan Laboratorium Lingkungan. 16 Desember 2017. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, Jakarta 2017

3. KULKARNI SJ. Review On Studies, Research And Surveys On Rainwater Harvesting. International Journal of Research and Review. 3:9(2016)6-11.
4. JUNE MELLAWATI. Kajian dampak lepasan radionuklida dari pengoperasian PLTU dan PLTN ke lingkungan. Iptek Nuklir. Bunga Rampai Batan. ISSN 2087-8079. Tahun 2010
5. TAE YOUNG KONG, SIYOUNG KIM, YOUNGJU LEE, JUNG KWON SON, SUNG JUN MAENG. Radioactive Effluents Released From Korean Nuclear Power Plants and The Resulting Radiation Doses to Members of The Public. Nuclear engineering and Technology 49(2017)1772-1777.
6. THEODOROS CHRISTOUDIAS, YIANNIS PROESTOS, JOS LELIEVELD. Atmospheric Dispersion of Radioactivity from Nuclear Power Plant Accidents: Global Assessment and Case Study for the Eastern Mediterranean and Middle East. Energies 7(2014)8338-8354.
7. BAPETEN, Nilai Batas Radioaktivitas Lingkungan, PERKA BAPETEN No.07 tahun 2017 , Jakarta,2017.
8. KEMENTERIAN KESEHATAN REPUBLIK INDONESIA. Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia No. 416/MENKES/PER/IX/1990 Tanggal : 3 September 1990. Jakarta. 1990.
9. B.C. RUSSELL, IAN W. CROUDACE, PHIL E. WARWICK. Determination of <sup>135</sup>Cs and <sup>137</sup>Cs In Environmental Samples: A Review. Analytica Chimica Acta. Vol.890(2015)7-20
10. CLÉLIA LE GALLIC, YOHANN PHALENTE, LINE MANENS, ISABELLE DUBLINEAU, MARC, MARC BENDERITTER, YANN GUEGUEN, STEPHANIE LEHOUX, TENI G. EBRAHIMIAN. Chronic Internal Exposure to Low Dose <sup>137</sup>Cs Induces Positive Impact on the Stability of Atherosclerotic Plaques by Reducing Inflammation in ApoE<sup>-/-</sup> Mice. PLoS ONE 10:6(2015)1-21.
11. BATAN, Laporan Evaluasi Tapak RDE Aspek Dispersi. PKSEN, BATAN, Jakarta, 2016.
12. YEOM, JUNGMIN, SHIN, DAEYEWN, KIM, SOONGPYUNG, JU, SUNDONG, OH, YOUNGSOO, KIM, BYUNGGYU, KIM, SUNSIK, Trend Of Gross Beta Radioactivity In Air Particles And Rainwater Of Around The Domestic Nuclear Power Plants. Spring Meeting of the KNS(Korean Nuclear Society). Jeju (Korea, Republic of), 28-30 May 2014 Daejeon (Korea, Republic of).

#### **DISKUSI/TANYA JAWAB**

##### **1. PERTANYAAN :**

Bagaimana tata cara penetapan titik-titik pengamatan agar bias dianggap mewakili Kawasan Nuklir Serpong? Susetyo Trijoko (PKSEN-BATAN)

##### **JAWABAN :**

Pada pemantauan yang dilakukan hanya pada satu titik yaitu di lokasi pemukiman perumahan Batan Indah yang terkait dengan masyarakat yang menggunakan air hujan untuk keperluan sehari-hari. Pemantauan dilakukan di seluruh Indonesia, 1 titik di Serpong.

Halaman ini sengaja di kosongkan

# **KELOMPOK C**

---

**TAPAK DAN TEKNOLOGI REAKTOR**

Halanan ini sengaja dikosongkan

**KAJIAN PERCEPATAN TANAH  
DI CALON TAPAK PLTN BATAM UNTUK MENDAPATKAN TAPAK POTENSIAL**

<sup>1)</sup>Hadi Suntoko, <sup>2)</sup>Mujiono, <sup>3)</sup>Siti Alimah, <sup>4)</sup>Ajat Sudrajat,

<sup>1,2,3)</sup> PKSEN BATAN hadi\_suntoko@batan.go.id,

<sup>4)</sup> Pusat Gempa Bumi dan Tsunami, BMKG

**ABSTRAK**

**KAJIAN PERCEPATAN TANAH DI CALON TAPAK PLTN BATAM UNTUK MENDAPATKAN TAPAK POTENSIAL.** Kota Batam terletak di kepulauan Riau dikategorikan sebagai daerah yang terletak di wilayah aman dari gempa bumi karena letaknya di luar zona tektonik aktif Semangko. Gempa besar pernah terjadi dengan magnitudo momen sebesar 6,6 berpusat di Pulau Sumatra, berjarak 310 km dari kota Batam sebagai calon Tapak. Guna mendapatkan tapak potensial yang aman dan memenuhi syarat dari aspek kegempaan perlu dilakukan kajian percepatan tanah yang merupakan bagian persyaratan aspek kegempaan di wilayah Pulau Batam dan sekitarnya. Tujuan kajian untuk mendapatkan tapak potensial sesuai yang disyaratkan dari nilai percepatan tanah terhadap calon tapak PLTN. Tahapan penelitian meliputi pengumpulan dan pengolahan data gempa, sumber gempa dan analisis bahaya gempa dengan pendekatan menggunakan analisis Fungsi Atenuasi disertai dengan analisis probabilitas untuk mendapatkan percepatan tanah puncak dengan kala ulang tertentu. Analisis probabilitas dalam penelitian ini menggunakan Metode Gumbel. Bahaya gempa menggambarkan nilai percepatan getaran puncak PGA. Hasil kajian menunjukkan peta bahaya gempa dengan nilai PGA pada wilayah Kota Batam pada periode ulang 100 tahun adalah 0.0016 g.

Kata Kunci : Percepatan tanah, Tapak PLTN, Gempa Bumi,

**ABSTRACT**

**ASSESSMENT OF GROUND ACCELERATION IN NPP CANDIDATES SITE IN BATAM TO GET POTENTIAL SITE.** Batam City is located in the Riau archipelago categorized as an area located in an area safe from earthquakes because it is located outside the active tectonic zone of Semangko fault. A larger earthquake occurred with a moment magnitude of 6.6 centered on the island of Sumatra, a distance of 310 km from the Batam as a proposed site. In order to get a potential site that is safe and meets the requirements of the seismic aspect, it is necessary to study the acceleration of the land which is part of the seismic aspect requirements in Batam Island and its surroundings. The objective of the study was to obtain potential sites according to the required values of peak ground acceleration against potential PLTN sites. The research stages include collecting and processing earthquake data, earthquake sources and seismic hazard analysis with an approach using the Attenuation Function analysis accompanied by a probability analysis to obtain peak ground acceleration with a certain return. Probability analysis in this study uses the Gumbel Method. The earthquake hazard describes the PGA peak vibration acceleration value. The results of the study show that the earthquake hazard map with PGA values in the Batam City area on the 100-year return period is 0.0016 g.

Keywords: Ground acceleration, Nuclear Power Plant site, Earthquake

**PENDAHULUAN**

Kota Batam merupakan calon tapak PLTN hasil kegiatan pra survei tapak 2015-2017 yang diidentifikasi sebagai tapak yang terletak di daerah aman dari Bencana Gempa bumi Indonesia [1]. Namun demikian sesuai Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 8 tahun 2013 tentang evaluasi tapak untuk Aspek Kegempaan, mensyaratkan bahwa tapak PLTN tidak boleh terdapat patahan kapabel di sekitar tapak (radius 5 km) dan nilai percepatan tanah (PGA) di batuan dasar tidak boleh lebih besar dari 0.4 g [2].

Kegempaan atau Gempa bumi diartikan sebagai suatu getaran di permukaan bumi disebabkan dari peristiwa pergerakan mendadak dari suatu tubuh batuan karena proses pelepasan dari akumulasi regangan (strain) energi di luar batas elastis batuan. Kebanyakan gempa bumi disebabkan dari pelepasan energi yang dihasilkan oleh tegangan yang dilakukan oleh lempengan yang bergerak. Semakin lama tegangan itu semakin membesar dan mencapai keadaan dimana tegangan tidak dapat

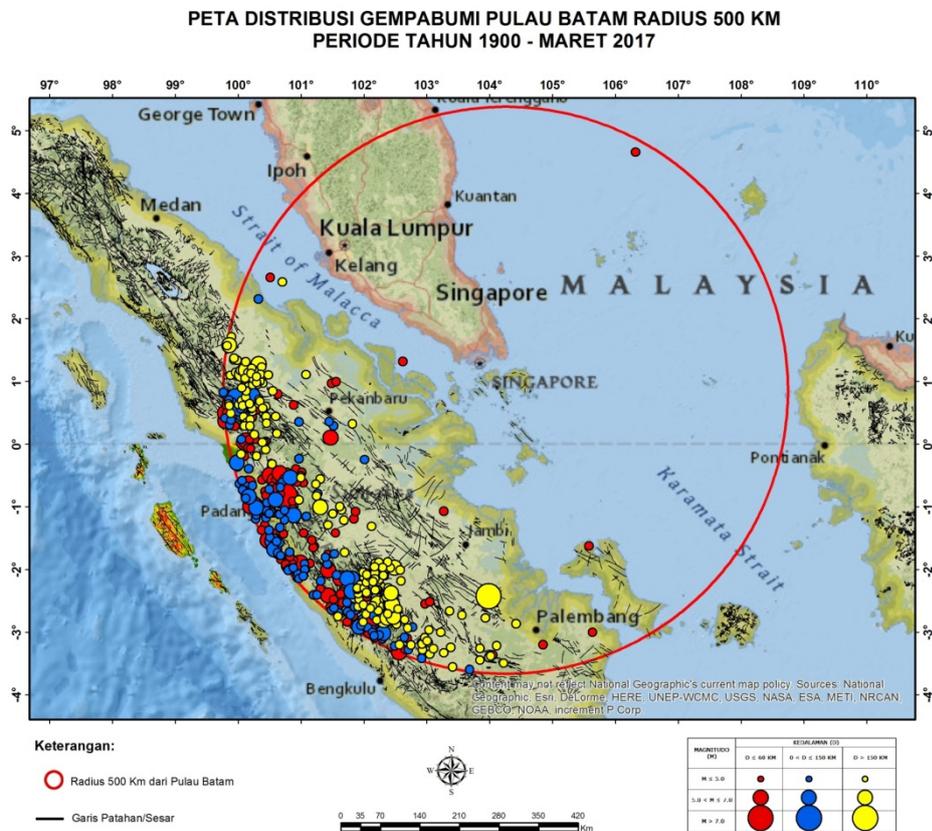
ditahan oleh massa batuan. Gempa bumi yang disebabkan oleh pergerakan lempeng tektonik ini disebut sebagai gempa bumi tektonik. Dampak kondisi tektonik inilah yang menjadikan Indonesia terutama wilayah Sumatra yang diduga sebagai wilayah yang rawan terhadap bencana gempa bumi terutama gempa bumi tektonik yang menyebabkan tsunami [3].

Didalam Peta Seismotektonik daerah Sumatra, dan Kota Batam Serpong, radius 500 Km geotektonik tunjangan aktif lempeng samudera Hindia – Australia dengan lempeng benua Eropa – Asia dan Lajur Sumber Gempa bumi patahan – patahan aktif di daratan Sumatra bagian Timur (patahan aktif Sumatera) [4]. Melalui analisis geotektonik dan seismisitas, maka mitigasi bencana gempa bumi sangat diperlukan untuk mengurangi bahaya yang diakibatkan oleh kejadian gempa bumi.

Secara umum ada beberapa metoda yang biasa digunakan untuk menghitung dan menduga nilai percepatan gempa yang dapat membahayakan pondasi bangunan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN), berdasarkan skenario gempa bumi yang telah ditentukan [5]. Nilai percepatan tanah ini dihitung berdasarkan distribusi probabilitas yang memperhitungkan pengaruh faktor-faktor ketidakpastian, lokasi dan waktu kejadian gempa bumi. Dengan menggunakan metode DSHA dapat diketahui tingkat bahaya gempa bumi, dan bahaya yang terjadi selanjutnya didefinisikan dalam bentuk nilai percepatan tanah di batuan dasar yang diwakili oleh nilai PGA (*Peak Ground Acceleration*) dengan periode ulang 100 tahun [6].

Percepatan getaran tanah merupakan getaran yang pernah terjadi di suatu tempat yang diakibatkan oleh gempa bumi. Kramer 1996 mengatakan bahwa percepatan tanah akibat gempa bumi itu menunjukkan gaya inersia yang bekerja pada massa struktur, dan munculnya gaya ini karena kecenderungan massa bangunan untuk mempertahankan diri [7]. Hasil ini perlu dikorelasikan dan disesuaikan dengan kondisi geologi, dan karakteristik seismik lokasi yang dijadikan daerah target perhitungan, Gambar 1.

Tujuan kajian untuk identifikasi gempa dan melihat nilai percepatan tanah terhadap calon tapak PLTN Batam disamping itu untuk mengetahui angka kejadian gempa terhadap lokasi dengan melihat kelayakan tapak yang telah ditentukan.



Gambar 1. Peta seismotektonik, penyebaran patahan dan subduksi 500 km [8]

Penelitian ini menggunakan metode yang meliputi identifikasi sumber gempa bumi, pemodelan tektonik, penentuan model probabilitas yang diperoleh dari magnitudo dan jarak, serta parameter gerakan tanah (*ground motion*) [9]. Lingkup kegiatan diawali dari pengumpulan data, pengolahan, analisis dan pelaporan. Hasil kajian diharapkan dapat memberikan nilai percepatan tanah sesuai izin tapak yang layak dan aman sehingga dapat memberikan informasi tahap berikutnya.

## METODOLOGI

Kajian dalam perhitungan percepatan tanah ini menggunakan metode yang meliputi tahapan, mengenali karakteristik sumber gempa bumi yang terjadi di wilayah Kota Batam dan sekitarnya terkait dengan lokasi sumber, geometri patahan dan mekanisme kejadian gempa bumi [3]. Yang kedua model seismotektonik yang terdiri dari sumber gempa, dari besarnya magnitudo dan jarak, dan ketiga penentuan model probabilitas diperoleh dari magnitudo dan jarak, dengan parameter percepatan tanah maksimum yang diperoleh dari fungsi atenuasi. Keempat ketidak pastian dari lokasi gempabumi, magnitudo dan gerakan tanah (*ground motion*). Bagiam penyusunan percepatan tanah adalah katalog gempa bumi yang tersusun dari kejadian gempa, meliputi lokasi, kedalaman, waktu, dan skala magnitudonya. Magnitudo yang diperlukan berskala besar  $M_w > 5.0$  dengan kedalaman mak. 300 km, periode yang diambil adalah 1900 hingga 2017 [10]. Perlu penyeragaman dalam katalog seperti nilai seperti magnitudo momen ( $M_w$ ), peristiwa saturasi magnitudo tidak terjadi dan bentuk representasi nilai energi yang dilepaskan [11].

Pengolahan data untuk mendapatkan nilai percepatan tanah ini menggunakan fungsi Atenuasi dari Boore et al. (1997) sedangkan analisis probabilistik untuk memperhitungkan kemungkinan yang akan terjadi, digunakan metode Distribusi Gumbel dengan periode ulang 100 tahun. Untuk mengestimasi resiko gempabumi perlu periode waktu dan menganggap bahwa katalog yang diinput cukup lengkap.

Fungsi atenuasi Boore et al. (1997) adalah fungsi atenuasi untuk mendapatkan nilai percepatan tanah maksimum ( $a$ ) dengan persamaan sebagai berikut:

$$a = 0,49 + 0,23(M - 6) - \log \sqrt{R^2 + 8^2} - 0,0027 \sqrt{R^2 + 8^2} \text{ dalam (g)}$$

dimana  $R$  adalah Jarak Hiposentrum (km)

Sumber-sumber gempabumi yang digunakan untuk perhitungan resiko gempabumi terhadap lokasi calon tapak PLTN di Pulau Batam adalah gempabumi yang bersumber dari zona Subduksi dan Zona Patahan. Sumber gempa bumi subduksi merupakan sumber gempa yang terjadi di dekat batas pertemuan lempeng samudra yang menunjam masuk ke bawah lempeng benua. Dalam kajian ini yang dimaksud adalah zona mega thrust yakni sumber gempa subduksi yang memiliki ke dalaman 50 km, dengan kedalaman  $> 50$  km dari zona benioff sebagai sumber *deep background*. Sumber gempabumi patahan merupakan kejadian gempa bumi yang diakibatkan oleh adanya pergeseran patahan dangkal. Parameter-parameter yang digunakan model gempa sesar adalah mekanisme pergerakan, panjang dan lebar patahan. Penentuan lokasi patahan di dapatkan dari referensi jurnal internasional maupun dalam negeri yang telah dipublikasikan [13].

Sedangkan sumber gempa *background* adalah model sumber gempa bumi yang diidentifikasi dari keterdapatannya data seismogenik-nya dan jelas ada kejadian gempa bumi di daerah tersebut. Seismogenik ini meliputi geometri atau geomorfologi lempeng tektonik seperti patahan dan zona subduksi [14]. Kejadian gempa *background* umumnya adalah gempa – gempa berskala kecil sampai sedang [15][16][17].

Setelah itu mencari nilai konstanta dari parameter Gumberl I yaitu  $A$ ,  $B$ ,  $\alpha$  dan  $\beta$  menggunakan persamaan berikut:

$$G(M) = e^{(-\alpha \exp(-\beta M))}; M \geq 0$$

dimana :

$\alpha$  = jumlah gempa rata-rata per tahun

$\beta$  = parameter yang menyatakan hubungan antara distribusi gempa dengan magnitudo  
M = Magnitudo gempa

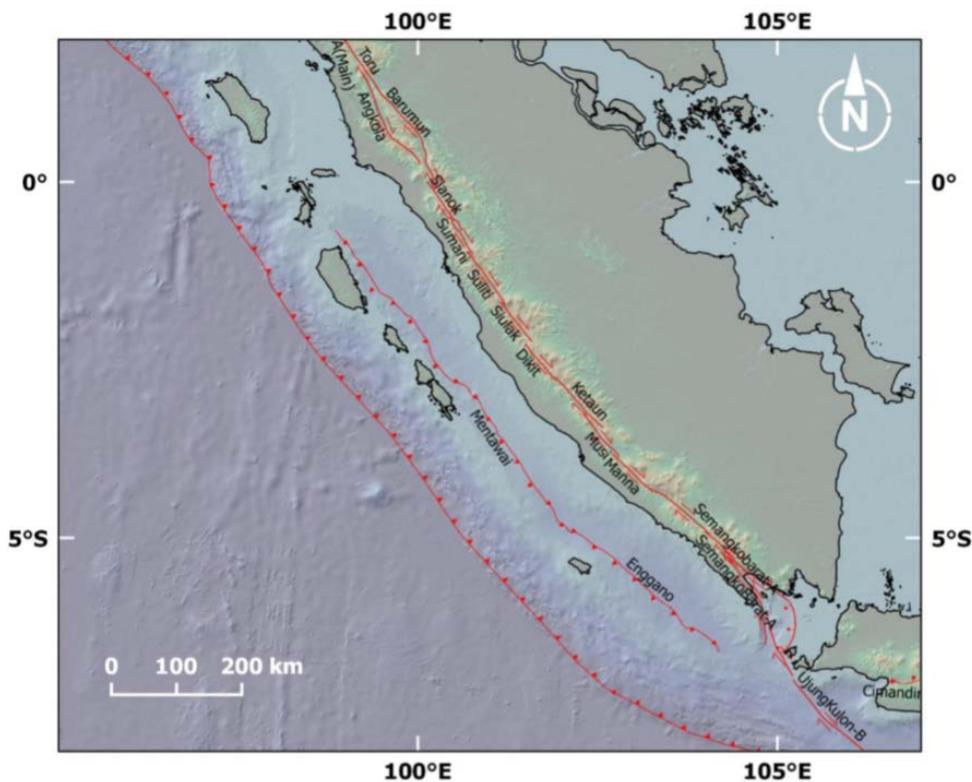
Kemudian, setelah mendapatkan konstanta A, B,  $\alpha$  dan  $\beta$  di setiap lokasi di Pulau Batam, proses selanjutnya adalah menghitung korelasi antara periode ulang T dan percepatan dengan menggunakan rumus berikut:

$$a = \frac{\ln(T \cdot \alpha)}{\beta}$$

Keberterimaan calon tapak potensial di dasarkan nilai percepatan tanah dan patahan permukaan di sekitar tapak. Nilai percepatan tanah di batuan dasar tidak lebih dari 4 gal dan tidak terdapat patahan permukaan dalam radius 5km dari calon tapak potensial. Konfirmasi lapangan untuk mendapatkan data struktur geologi dan kelurusan kelurusa yang diakibatkan gerak gerak tektonik di permukaan [18][19].

## HASIL DAN PEMBAHASAN

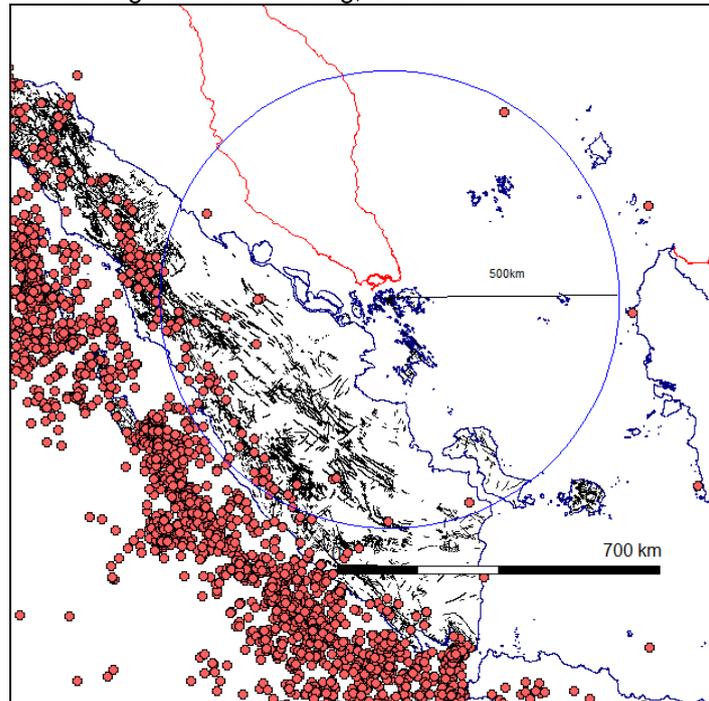
Hasil kajian berdasarkan data struktur geologi yang terpublikasikan kondisi seismotektonik radius 500 Km, calon tapak PLTN Batam terletak dalam lingkup geotektonik patahan aktif Sumatra, Mentawai dan subduksi Sumatra. Pemetaan Zona Sesar Sumatra yang dilakukan dengan menggunakan foto udara dengan skala 1:100.000 dan peta topografi dengan skala 1:50.000 [20]. Penelitian tersebut memiliki skala yang cukup besar untuk memungkinkan pembedaan segmentasi sesar sehingga dapat digunakan untuk identifikasi patahan patahan untuk evaluasi bahaya kegempaan. Patahan aktif Semangko meliputi patahan Tanu, Barumun, Angkola, Slanak, Sumani, Suliti, dan Siulak [5].



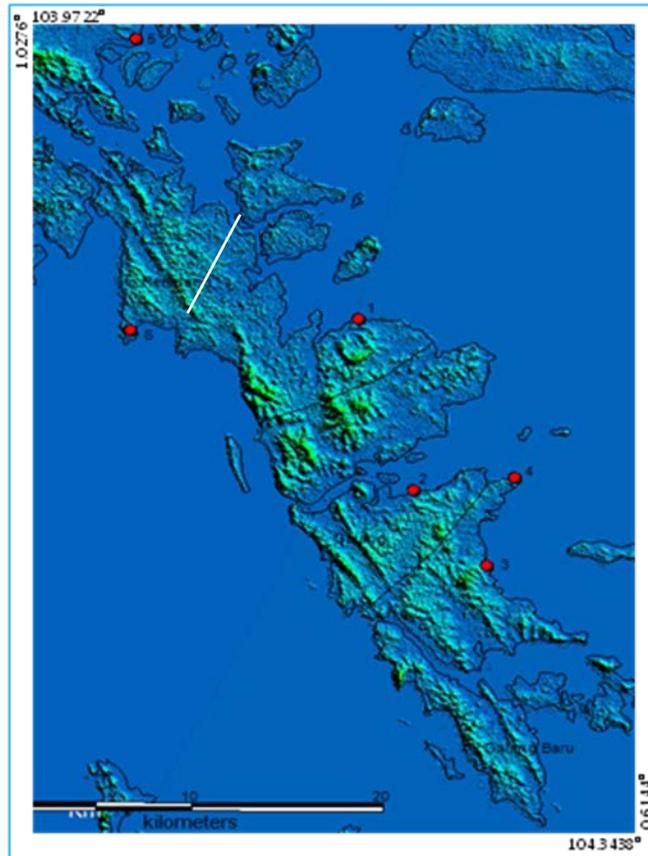
Gambar 8. Sesar-Sesar Aktif dan segmen di Wilayah Sumatra bagian selatan, Sumber Pusgen PU 2017 [20].

Analisa keboleh jadian bahaya kegempaan/probabilistic seismic hazard menggunakan fungsi atenuasi dan periode ulang gempa berdasarkan posisi daerah penelitian di tapak calon PLTN kota Batam (Rempang Galang) menghasilkan bahaya probabilistik berupa peta percepatan puncak di batuan dasar dengan PGA T=0 detik, area penelitian radius 500 km, dengan periode ulang 100 tahun [21] .

Penggunaan data katalog gempabumi berisi gempa gempa utama/mainshock, nilai magnitudo digunakan diatas 5 Mw dan kedalaman maksimum pusat gempa 300 Km. Patahan yang digunakan patahan dekat dengan calon tapak, patahan Semangko. Data subduksi digunakan megathrust Magnitudo Maks 9.0 di zona Subduksi Sumatra. Jenis katalog meliputi USGS, BMKG. Komposisi data kejadian gempa radius 500 Km dari calon tapak digabung dari berbagai sumber katalog, Gambar 2.



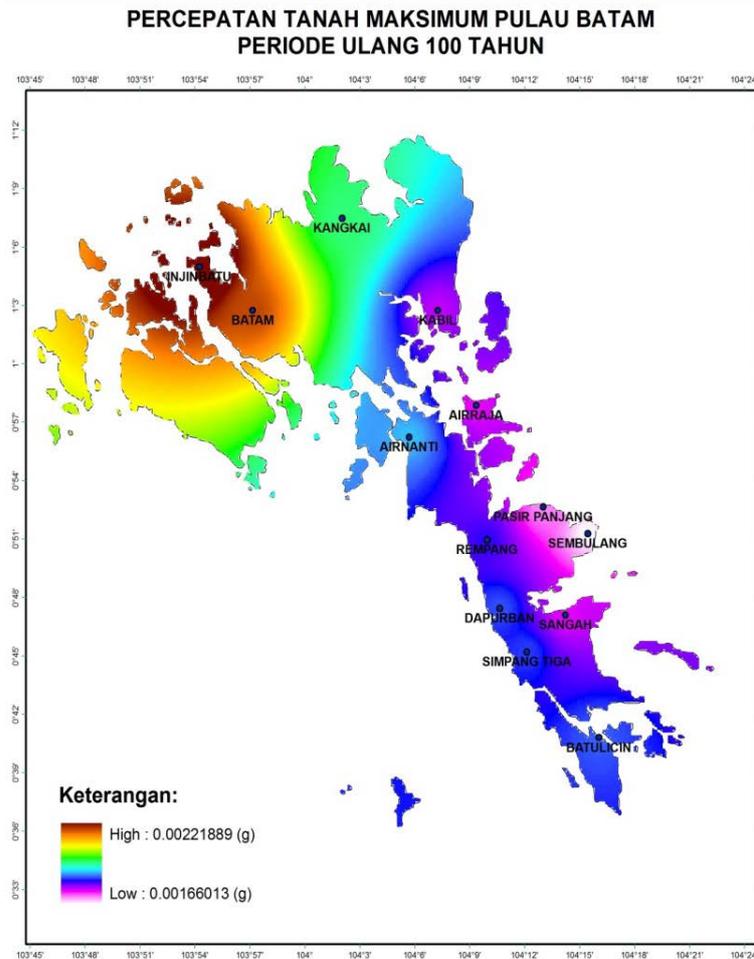
Gambar 2. Plot data gempa untuk katalog gabungan USGS, BMKG, dalam radius 500 km dari calon tapak PLTN Kota Batam [8]



Gambar 3. Survei elemen struktur geologi di Rempang Galang [8][25]

Hasil survei elemen struktur geologi di Kota Batam meliputi daerah Rempang hingga Galang, Kecamatan Galang. Secara umum didominasi oleh kekar kekar yang terjadi pada batuan sedimen tua dan pada batuan tersebut ada satu indikasi menunjukkan bukti pergerakan pelapisan yang diakibatkan adanya tektonik [22]. Arah bidang sesar N192E/78°E, lihat Gambar 3, pada warna garis putih, Daerah yang terindikasi patahan selanjutnya dibafer dalam radius 5 km. Daerah yang aman dari patahan aktif meliputi Pantau Pasir Panjang-Rempang, Dapur 3-Sembulung, Tanjung Rame-Galang [23].

Kajian percepatan tanah mengacu pada hasil investigasi geoteknik lokasi calon tapak yang tersusun dari batuan tua dan relatif terlapukan dapat dikategorikan sebagai jenis Tanah Sedang, dengan amplifikasi 1 [24]. Hasil analisis percepatan tanah di Kota Batam atau Balerang (Batam, Rempang Galang) dari sumber gempa periode ulang 100 tahun untuk wilayah calon tapak Batam menunjukkan nilai 0,001-0,002 g di puncak batuan dasar, Gambar 4.



Gambar 4. Peta Hazard batuan dasar PGA (T=0 detik) periode ulang 100 tahun [23]

Keberterimaan dari hasil kajian nilai percepatan tanah dan patahan permukaan yang telah di plotting dalam suatu peta, menunjukkan bahwa berdasarkan nilai percepatan tanah maka secara umum calon tapak memiliki nilai percepatan tanah yang sangat kecil (-0,0022 - 0,0016 g) dan jauh dari persyaratan yang disarankan oleh pihak BAPETEN maupun IAEA. Sedangkan patahan permukaan hanya ditemukan di Pantai Kelingking Kecamatan Galang, selanjutnya kelurusan tersebut dibafer dan menunjukkan daerah radisu 5 km dari dugaan kelurusan patahan adalah daerah yang tidak layak untuk menjadi tapak potensial.

## KESIMPULAN

Hasil konfirmasi lapangan di calon tapak PLTN menunjukkan singkapan batuan didominasi oleh batuan sedimen berumur tua yang sebagian terdapat kekar kekar disebabkan oleh beban pelapisan. Satu lokasi pengamatan teridentifikasi yang cukup tua wilayah yang aman dari gempa, dan aktivitas patahan aktif.

Hasil kajian percepatan tanah diperoleh nilai 0,001g di puncak batuan dasar, periode ulang 100 tahun, hal ini memenuhi ketentuan Perka BAPETEN No. 8 tahun 2013. Calon tapak potensial berada di luar jalur bafer 5 km, meliputi Kecamatan Galang.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kepala Pusat PKSEN, Bapak Dr. Suparman yang telah memberikan bimbingan dan arahan hingga tulisan ini selesai. Kepada Kepala Bidang KDT, Bapak Dr. Sunarko yang telah mengkoreksi tulisan ini hingga selesai, Bapak Ajat Sudrajat dari BMKG yang telah bekerja sama hingga tulisan ini selesai serta teman-teman semua di Bidang KDT.

## REFERENSI

- 1) Puslitbang Geologi/ Pusat Suvei Geologi, Badan Geologi, 2003.
- 2) Perka BAPETEN No.8 tentang Evaluasi Tapak Aspek Kegempaan untuk Industri Nuklir, Jakarta tahun 2013.
- 3) Meilano, I., Abidin, H. Z., Andreas, H., Gumilar, I., Harjono, H., Kato, T., ... & Fukuda, Y. (2012). Slip rate estimation of the Lembang Fault West Java from geodetic observation. *Journal of Disaster Research*, 7(1), 12-18.
- 4) Sari, E. P., & Subakti, H. (2015, April). Identification of Baribis fault–West Java using second vertical derivative method of gravity. In 4th International Symposium on earthquake and Disaster Mitigation 2014 (ISED 2014), Vol. 1658, p. 030016, AIP Publishing.
- 5) Soehaimi, A., Effendi, I., Djuhanda, A., Hayat, D.Z., dan Hutubessy, S., 2004, Peta seismotektonik daerah Selat Sunda dan sekitarnya, Skala 1 : 500.000, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- 6) Supartoyo, Surono, dan Putranto, E.T., 2014, Katalog Gempabumi Merusak Indonesia Tahun 1612 – 2014 (Edisi Kelima), Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, Badan Geologi, Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral: 121 hal.
- 7) Kramer, 1996, Geotechnical Earthquake Engineering Upper Saddle River, Jersey 07458, Prentice Hall Inc.
- 8) Ajat Sudrajat, 2017, Laporan Hasil Kegiatan Konfirmasi lapangan Untuk Mendapatkan Daerah Interes di Batam, Pusat Data Gempa dan Tsunami, BMKG, Jakarta.
- 9) Asrurifak, M., et al O., 2010. Development of Spectral Hazard Map for Indonesia with a Return Period of 2500 Years using Probabilistic Method: Civil Engineering Dimension, Vol. 12, No. 1, March 2010, 52-62.
- 10) Risk Engineering (2005). EZ-FRISK, Software for Earthquake Ground Motion : User's Manual : Risk Engineering Inc.
- 11) GlobalCMT. Earthquakes Data Catalog. Global Centroid-Moment-Tensor. <http://www.globalcmt.org>. 2013
- 12) Modul Software USGS, Training Bimtek BMKG (M. Asrurifak-2014)
- 13) BATAN, Laporan Evaluasi Tapak Reaktor Daya Eksperimental (Lanjutan) Kawasan Puspitak Serpong, tidak dipublikasikan, Jakarta, 2015.
- 14) Bock, Y., Prawirodirdjo, L., Genrich, J. F., Stevens, C. W., McCaffrey, R., Subarya, C., ... & Calais, E. (2003). Crustal motion in Indonesia from global positioning system measurements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978–2012), 108(B8).
- 15) Ringkasan Hasil Studi Tim Revisi Peta Gempa Indonesia (2017)
- 16) Keller, E.A. dan Pinter, N., 2002, Active Tectonic Earthquake, Uplift and Landscape, Prentice hall, Upper Saddle River, New Jersey 07458: 362 pp.
- 17) Keller, E.A. dan Pinter, N., 1996, Active Tectonic Earthquake, Uplift and Landscape, Prentice hall, Upper Saddle River, New Jersey 07458: 338 pp.
- 18) IAEA, Safety Requirements No NS-R-3.3., " Site Evaluation for Nuclear Installations", IAEA Vienna, tahun 2003.
- 19) USGS. PDE-USGS Earthquakes Data Catalog. <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search>. 2014
- 20) Pusat Litbang Perumahan dan Pemukiman, Badan Penelitian dan Pengembangan Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PU), 2017, Peta Sumber dan Bahaya Gempa Di Indonesia 2017, Bandung
- 21) Dardji, N., Villemin, T., & Rampnoux, J. P. (1994). Paleostresses and strike-slip movement: the Cimandiri fault zone, West Java, Indonesia. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 9(1), 3-11.
- 22) Kusnama K, Sutisna TC, Amin S, Kusuma Dinata, Sukardi, B Hermanto, Peta Geologi Lembar Tanjung Pinang, Sumatra, P3G, Bandung, 1994.
- 23) Hadi Suntoko, 2017, Dokumen Dukungan Teknis Survei Tapak PLTN Kepulauan Riau Tahap Regional Aspek Kegempaan, PKSEN BATAN, Jakarta
- 24) Hanifa, N. R., Sagiya, T., Kimata, F., Efendi, J., Abidin, H. Z., & Meilano, I. (2014). Interplate coupling model off the southwestern coast of Java, Indonesia, based on continuous GPS data in 2008–2010. *Earth and Planetary Science Letters*, 401, 159-171.
- 25) Jarvis, A., Reuter, H. I., Nelson, A., & Guevara, E. (2008). Hole-filled SRTM for the globe Version 4. available from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database (<http://srtm.csi.cgiar.org>).

## **PERTIMBANGAN OSEANOGRAFI FISIK DAN POTENSI TSUNAMI TAHAP PRA-SURVEI DALAM PEMILIHAN TAPAK PLTN DI PROVINSI NTB**

**Heni Susiati<sup>1</sup>, Hadi Suntoko<sup>1</sup>, Slamet Suryanto<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Pusat Kajian Sistem Energi Nuklir-BATAN  
Jl. Kuningan Barat, Mampang Prapatan Jakarta 12710,  
E-mail: [heni\\_susiati@batan.go.id](mailto:heni_susiati@batan.go.id)*

### **ABSTRAK**

**PERTIMBANGAN OSEANOGRAFI FISIK DAN POTENSI TSUNAMI TAHAP PRA SURVEI DALAM PEMILIHAN TAPAK PLTN DI PROVINSI NTB.** Telah dilakukan penelitian karakteristik oseanografi fisik dan potensi tsunami dalam pemilihan tapak PLTN di NTB (Nusa Tenggara Barat). Data Oseanografi fisik dan potensi tsunami merupakan bagian dari aspek Hidrologi, dan merupakan salah satu aspek yang harus diidentifikasi dalam proses pemilihan tapak PLTN. Oseanografi fisik dalam studi ini meliputi data batimetri, gelombang, pasang surut, dan potensi bahaya eksternal yang diakibatkan oleh adanya potensi gelombang perairan ekstrim yang dapat terjadi akibat pergerakan adanya sumber gempa sehingga mengakibatkan potensi terjadinya tsunami. Tujuan penelitian adalah mengidentifikasi kesesuaian daerah pesisir untuk area tapak PLTN di NTB dengan mempertimbangkan data oseanografi fisik dan potensi tsunami dalam tahap awal pemilihan tapak PLTN di NTB. Metodologi meliputi pengumpulan data sekunder terkait dengan parameter oseanografi fisik dan daerah pesisir NTB yang berpotensi terjadi tsunami, kajian pustaka dan selanjutnya dilakukan identifikasi untuk mendapatkan kesesuaian tapak PLTN. Berdasar kajian awal tahap pra survei aspek hidrologi di wilayah pesisir NTB, diperoleh area pesisir yang sesuai untuk tapak PLTN. Hasil penelitian pada tahap pra-survei memperlihatkan bahwa di wilayah Provinsi NTB, khususnya pulau Lombok kurang berpotensi sebagai tapak PLTN. Sedangkan wilayah pesisir pulau Sumbawa masih ada beberapa kawasan pesisir yang mempunyai potensi sebagai tapak PLTN. Namun demikian untuk memastikan daerah pesisir yang potensial sebagai tapak PLTN, diperlukan identifikasi lebih lanjut untuk dapat dipastikan lokasi tapak aman dari potensi bahaya tsunami dll.

Kata kunci: oseanografi fisik, tsunami, pra-survei, pemilihan tapak, PLTN.

### **ABSTRACT**

**PHYSICAL OCEANOGRAPHIC AND TSUNAMI POTENTIAL CONSIDERATIONS OF THE PRE SURVEY STAGE IN NTB PROVINCE SITE SELECTION.** Research on physical oceanographic characteristics and potential of tsunamis in the selection of nuclear power plants (NPP's) in NTB (West Nusa Tenggara) has been carried out. Physical Oceanographic data and tsunami potential are part of the Hydrological aspect, and one aspect that must be identified in the NPP's site selection process. Physical oceanography in this study includes bathymetry, wave, tidal data, including the potential for external hazards caused by the presence of the potential for extreme water waves that can occur due to the movement of an earthquake source, resulting in the potential for a tsunami. The aim of the study was to identify the suitability of coastal areas for the NPP site area in NTB by considering physical oceanographic data and the potential for tsunamis in the initial stages of the selection of nuclear power plant sites in NTB. The methodology includes the collection of data secondary related to physical oceanographic parameters and the tsunami potential, literature review and then identification to obtain the suitability of the NPP site. Based on the preliminary study of the pre-survey phase of hydrological aspects in the coastal areas of NTB, a coastal area was obtained which was suitable for the NPP site. The results of the research at the pre-survey stage showed that in the Lombok Island has less potential as a NPP's site. While the coastal areas of Sumbawa Island still have several coastal areas that have potential as PLTN sites. However, to ensure potential coastal areas as PLTN sites, further identification is needed to ensure that the site is safe from potential hazards of these sources.

Keywords: physical oceanography, tsunami, pre-survey, site selection, NPP's.

## PENDAHULUAN

Peraturan Pemerintah No. 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional menempatkan energi nuklir sebagai opsi terakhir untuk pemenuhan bauran energi nasional. Disisi lain diversifikasi energi dengan menekankan pada penggunaan energi baru dan energi terbarukan menjadi prioritas untuk menggantikan energi fosil yang masih mendominasi bauran energi nasional. PP No, 79 Tahun 2014 mengamanatkan bahwa target yang dicanangkan pada tahun 2025 untuk energi baru dan energi terbarukan (EBT) adalah sebesar 23%, diantaranya energi baru PLTN[1].

Melihat proyeksi kebutuhan energi nasional, khususnya NTB yang memproyeksikan pembangunan kawasan ekonomi dan industri yang komprehensif, maka perlu pasokan energi yang cukup. Oleh karena itu pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) perlu dikaji lebih lanjut. Salah satu infrastruktur yang harus disiapkan dalam pembangunan PLTN adalah ketersediaan Tapak[1], pemilihan tapak merupakan salah satu langkah penting dalam rencana pembangunan PLTN. Berdasar perjanjian kerjasama antara BATAN dan Dinas ESDM Pemerintah Provinsi NTB No. B-1970/BATAN/SEN/KS0001/02/2018-415.4/404/DESDM/2018 tentang kajian pengembangan energi nuklir dan tapak PLTN untuk memenuhi kebutuhan listrik di wilayah Provinsi NTB, maka telah dilakukan survei awal (pra-survei) dalam pemilihan tapak PLTN di wilayah Provinsi NTB.

Penentuan tapak merupakan kegiatan seleksi, evaluasi dan konfirmasi suatu lokasi yang akan digunakan untuk pembangunan. Dalam kegiatan pra survei dalam pelaksanaan pemilihan tapak PLTN, salah satu aspek yang dipertimbangkan adalah aspek meteorologi dan hidrologi, termasuk diantaranya karakteristik oseanografi sebagai bagian dari kondisi lingkungan fisik laut. Dampak terhadap PLTN yang disebabkan oleh lingkungan fisik laut akan timbul banjir dari laut dan gangguan suplai air pendingin[2], sehingga merupakan salah satu aspek yang dapat mempengaruhi keselamatan dalam pemilihan tapak PLTN. Dengan demikian memahami karakteristik Kawasan pesisir NTB tersebut diperlukan penelitian yang berkaitan dengan karakteristik oseanografi fisik dalam survei awal pemilihan tapak PLTN di NTB. Tujuan penelitian adalah mengidentifikasi kesesuaian daerah pesisir untuk area tapak PLTN di NTB dengan mempertimbangkan data oseanografi fisik dan potensi banjir pantai serta tsunami dalam tahap awal pemilihan tapak PLTN di NTB.

Berkaitan dengan ketentuan keselamatan tapak PLTN, BAPETEN telah menetapkan peraturan tentang aspek Meteorologi dan Hidrologi[3]. Dalam IAEA *Specific Safety Guide* No. SSG-18 Tahun 2011, dalam program penyiapan tapak PLTN harus diidentifikasi dan kemungkinan yang menghasilkan fenomena bahaya harus dievaluasi[4]. Hasil evaluasi digunakan dalam desain instalasi nuklir, berdasar standar keamanan dengan mempertimbangkan karakteristik lokasi, risiko yang diakibatkan bahaya eksternal dan dampak pada lingkungan yang mungkin timbul. Identifikasi yang tepat harus dilakukan untuk menjamin bahwa risiko keseluruhan masih dapat diterima dan sekecil mungkin. Oleh karena itu, secara langsung atau tidak langsung, karakteristik oseanografi di sekitar lokasi dimana reaktor nuklir dibangun, pada kondisi tertentu dapat berpengaruh terhadap keselamatan reaktor tersebut.

Berdasarkan hal tersebut, maka dalam rencana pembangunan PLTN, pada pemilihan tapak reaktor diperlukan kajian aspek oseanografi, yang diperkirakan dapat membahayakan keselamatan reaktor nuklir. Jika dalam kajian mengindikasikan adanya bahaya yang tidak dapat diterima dan jika tidak ada solusi yang tersedia, maka tapak dianggap tidak layak[5,6]. Tujuan penelitian adalah mengidentifikasi karakteristik oseanografi fisik tahap pra-survei untuk pemilihan tapak PLTN di Provinsi NTB. Metode yang digunakan adalah kajian pustaka, pengumpulan data sekunder terkait dengan sumber bahaya eksternal dan selanjutnya dilakukan konfirmasi dan identifikasi berbagai jenis bahaya eksternal akibat tsunami dapat memberikan potensi bahaya terhadap keselamatan reaktor PLTN yang direncanakan di Provinsi NTB. Hasil studi diharapkan dapat memberi masukan bagi pengambil kebijakan, dalam penentuan lokasi tapak PLTN di Provinsi NTB.

Setiap wilayah pesisir dan perairan memiliki karakteristik perairan yang berbeda, baik itu disebabkan letaknya secara lintang geografis maupun akibat pengaruh-pengaruh yang terjadi di skala regional dalam perairan tersebut, baik yang mempengaruhi parameter fisik, kimia maupun biologinya[7]. Sumber kejadian eksternal akibat bahaya gelombang ekstrim salah satunya adalah potensi Tsunami yang tidak berkaitan dengan operasi instalasi

nuklir dan dapat menghasilkan potensi bahaya terhadap keselamatan instalasi nuklir (PLTN)[3,4].

### METODOLOGI

Metodologi meliputi kajian pustaka, pengumpulan data sekunder terkait dengan sumber bahaya eksternal akibat alam dan selanjutnya dilakukan konfirmasi dan identifikasi berbagai jenis bahaya eksternal akibat bencana alam yang berpotensi membahayakan reaktor PLTN yang direncanakan di Provinsi NTB. Pemilihan tapak PLTN pada tahap awal ini hanya mempertimbangkan karakteristik oseanografi dan potensi bahaya dari gelombang ekstrim seperti banjir maupun potensi tsunami. Selain studi literatur, penelitian ini juga dilakukan *ground check* lapangan untuk pengamatan secara visual pada lokasi pesisir pantai yang telah ditentukan. Selanjutnya data yang diperoleh dilakukan analisis terhadap kesesuaian terhadap keberterimaan tapak PLTN.

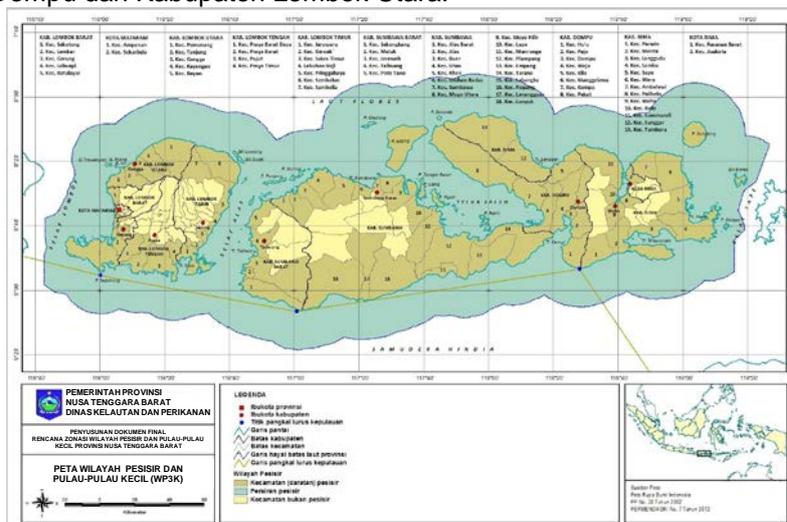
### HASIL DAN PEMBAHASAN

Lokasi dimana PLTN akan dibangun harus memenuhi persyaratan, diantaranya ketersediaan air bersih yang cukup memadai untuk memasok kebutuhan sistem pendingin dan fasilitas PLTN, sehingga wilayah pesisir merupakan pilihan untuk lokasi PLTN. Provinsi Nusa Tenggara Barat merupakan provinsi kepulauan yang terdiri dari pulau Lombok dan Pulau Sumbawa disertai 278 pulau-pulau kecil dengan luas perairan laut 29.159 km<sup>2</sup> dan panjang garis pantai mencapai 2.332,80 km sangat potensial di bidang kelautan dan perikanan, sehingga merupakan obyek yang sangat potensial untuk pengembangan banyak sektor seperti perikanan, pariwisata, konservasi, transportasi laut, industri maritim, kawasan industri dan kegiatan lainnya[8]. Beberapa wilayah pesisir di Provinsi NTB telah dilakukan survei awal untuk mendapatkan lokasi PLTN yang sesuai dengan ketentuan dan kriteria yang ditetapkan.

Secara geografis, wilayah Provinsi NTB berada pada posisi 115<sup>o</sup>46' - 119<sup>o</sup>05' Bujur Timur dan 08<sup>o</sup>10' - 09<sup>o</sup>05' Lintang Selatan (Gambar 1). Adapun batas-batas wilayah provinsi NTB memiliki batas-batas wilayah sebagai berikut:

- Sebelah utara : Laut Flores
- Sebelah timur : Selat Sape
- Sebelah selatan: Samudera Hindia
- Sebelah barat : Selat Lombok

Wilayah perairan pesisir Provinsi NTB terdapat dua pulau utama yaitu Pulau Lombok dan Pulau Sumbawa yang tidak tergolong pulau kecil. Pulau-pulau kecil tersebar di perairan sekitar kedua pulau utama tersebut sebanyak 278 pulau kecil (Gambar 1). Dengan kondisi tersebut maka Provinsi NTB termasuk kelompok/kategori "Provinsi Kepulauan". Adapun wilayah kabupaten yang seluruh kecamatannya tergolong wilayah pesisir adalah Kabupaten Dompu dan Kabupaten Lombok Utara.



Gambar 1. Peta Wilayah Pesisir dan Pula-Pula Kecil Provinsi NTB[8]

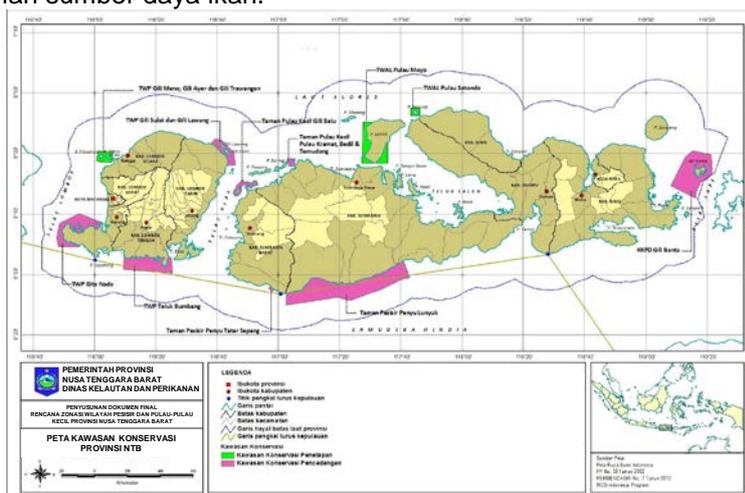
Disamping pertimbangan dari aspek meteorologi dan hidrologi, khususnya terkait karakteristik oseanografi fisik, dalam pemilihan tapak PLTN yang berkaitan dengan aspek

keselamatan, evaluasi aspek lain yang meliputi geologi, kegempaan, geofisika, kegunungpian, dan kejadian akibat ulah manusia juga telah dipertimbangkan. Kajian awal berdasar karakteristik oseanografi fisik di wilayah pesisir Provinsi NTB, akan diperoleh potensi tapak PLTN di wilayah pesisir Prov. NTB.

Dalam evaluasi karakteristik oseanografi, identifikasi sumber yang dapat memberikan potensi bahaya terhadap PLTN merupakan langkah awal dalam evaluasi. Pemahaman mengenai karakteristik suatu perairan ini diperlukan untuk mengetahui potensi dari suatu perairan tersebut sehingga pemanfaatan secara optimal dapat dilakukan. Demikian juga, berbagai faktor yang berpengaruh dalam evaluasi tapak adalah aspek keselamatan, aspek non keselamatan dan pertimbangan lain seperti abrasi, emisi gas, intrusi air laut dan lain-lain.

Di dalam dokumen WP3K untuk provinsi NTB, disebutkan bahwa pesisir NTB mempunyai banyak kawasan pantai yg telah berkembang sebagai kawasa pariwisata. Perairan WP3K Provinsi NTB dengan gelombang pantai yang tinggi dengan gelombang pecah plunging telah dikembangkan sebagai wisata surfing. Disamping juga terdapat potensi bencana yang dapat diakibatkan karena peristiwa alam, seperti gempa bumi, tsunami, gelombang ekstrim, gelombang laut berbahaya, letusan gunung api, banjir, kenaikan paras muka air laut, tanah longsor, erosi pantai, angin puting beliung, dan jenis bencana lainnya. Sedangkan bencana yang diakibatkan karena perbuatan orang meliputi jenis bencana: banjir, kenaikan paras muka air laut, tanah longsor, dan erosi pantai[8].

Terkait dengan penggunaan lahan pesisir, seperti kawasan konservasi, di NTB upaya konservasi bertujuan upaya perlindungan, pelestarian dan pemanfaatan sumber daya ikan, termasuk ekosistem, jenis, dan genetik untuk menjamin keberadaan, ketersediaan, dan kesinambungannya dengan tetap memelihara dan meningkatkan kualitas nilai dan keanekaragaman sumber daya ikan.



Gambar 2. Peta Kawasan Konservasi WP3K di Provinsi NTB Tahun 2016[8]

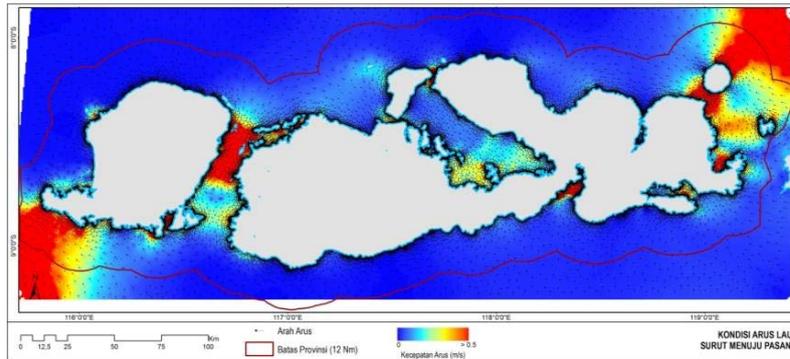
### Hasil Identifikasi Karakteristik Oseanografi Fisik di Wilayah Pesisir Provinsi NTB

Hasil penelitian menunjukkan bahwa karakteristik oseanografi di wilayah Provinsi NTB saat ini dapat dijelaskan sebagai berikut:

#### Pola dan Arah Arus

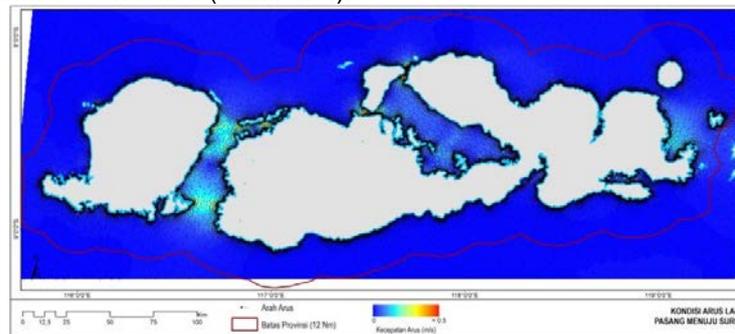
Data arus sangat diperlukan dalam penentuan tata letak program PLTN dan pendukungnya di pesisir pantai termasuk pendingin, maupun pengelolaan lingkungan laut[9]. Berdasarkan data sekunder, diketahui bahwa rata-rata kecepatan arus permukaan perairan Lombok selama setahun (2013) adalah berkisar antara 24 – 55 cm/det. Kecepatan arus tertinggi mencapai nilai lebih dari 40 cm/det terjadi pada bulan Januari, Maret dan tertinggi di bulan Juli 2013 mencapai 55 cm/det. Pada kondisi tersebut, wilayah yang terkena dampak paling tinggi adalah perairan teluk yang berada di daerah Lombok Bara, dimana terlihat arah arus hampir sepanjang tahun mengarah ke dalam perairan teluk yang berada di Kabupaten Lombok Barat tersebut.

Berdasarkan hasil pemodelan, arus laut di perairan NTB sangat dipengaruhi oleh fenomena pasang surut arah yang cenderung bolak balik. Pergerakan arus saat pasang, arus laut cenderung bergerak menuju darat dengan kecepatan 0-1.48 m/s (Gambar 3).



Gambar 3. Peta Arus Laut Perairan NTB (Kondisi Pasang)

Kecepatan arus sangat dipengaruhi oleh celah sempit di perairan NTB yang banyak terdapat pulau kecil dan pulau-pulau yang membentuk celah sempit, menjelaskan pola sebaliknya pergerakan arus keluar menuju laut lepas pada saat surut dengan kecepatan arus berkisar antara 0-0.78 m/s (Gambar 4).

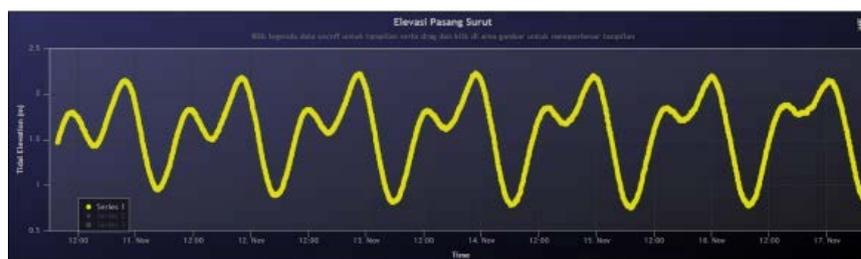


Gambar 4. Peta Arus Laut Perairan NTB (Kondisi Surut)

### Pasang Surut (Pasut)

Tipe pasang surut di perairan WP3K Provinsi NTB dipengaruhi oleh pasut dari Laut Flores dan dari Samudera Hindia yang keduanya bertipe campuran semi diurnal. Menurut DKP NTB (2015), hasil analisis data pengamatan pasang surut di Lembar diperoleh nilai komponen pasang surut utama sebagai berikut:  $S_2 = 16$ ,  $M_2 = 27$ ,  $K_1 = 35$  dan  $O_1 = 23$ . Dari nilai komponen pasang surut tersebut diperoleh bilangan F sebesar 1,35. Dengan nilai  $F = 1,35$  maka diketahui tipe pasang surut di perairan Selat Lombok dan sekitarnya adalah pasut campuran yang dominan ke harian ganda (Mixed Tide Predominantly Semi Diurnal) yaitu dalam satu hari terjadi dua kali pasang dan dua kali surut.

Kondisi Pasang Surut di Nusa Tenggara Barat yang diperoleh dari stasiun pasang surut Badas (Gambar 5.) menunjukkan bahwa tipe pasang surut di wilayah Nusa Tenggara Barat dan sekitarnya adalah campuran ganda. Pasang surut campuran ganda berarti dalam sehari bisa terjadi dua kali pasang dan dua kali surut tetapi terkadang terjadi satu kali pasang dan satu kali surut, hal ini didukung dengan kondisi pasut realtime stasiun Badas periode 10 November-17 November 2015, yang menunjukkan pola campuran ganda.

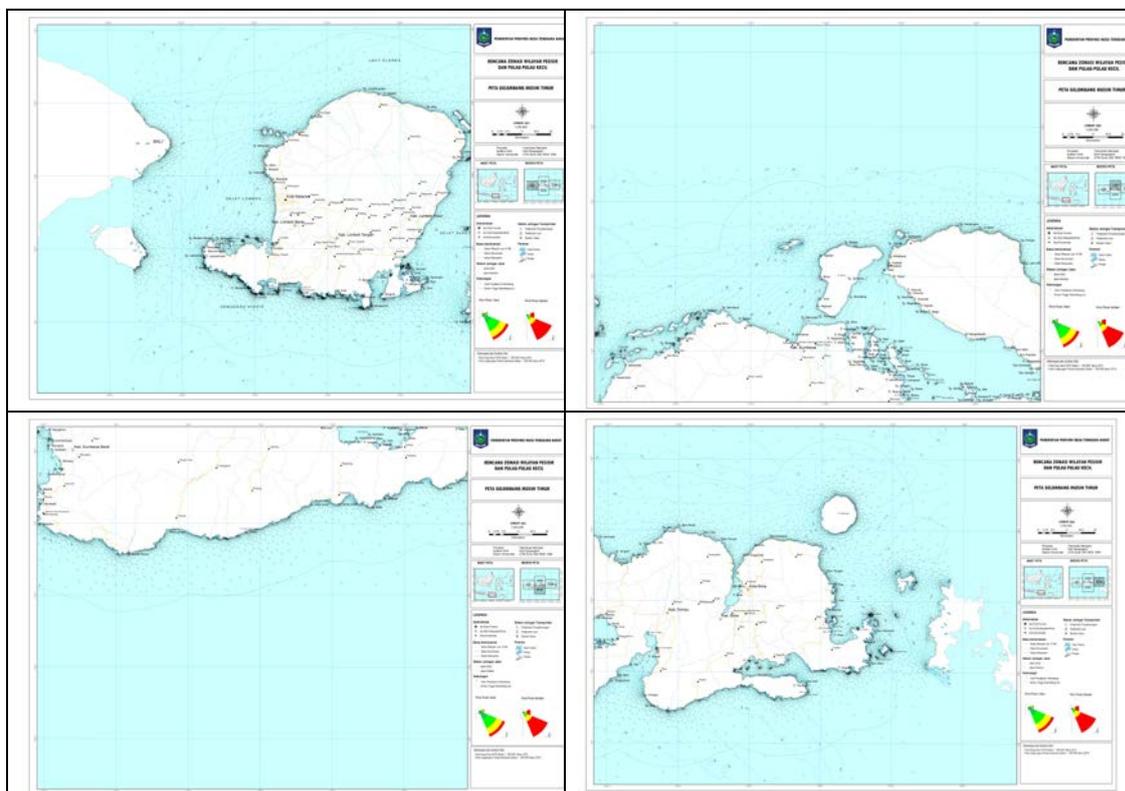


Gambar 5. Tinggi Pasang Surut Real Time Stasiun Labuhan Badas Sumbawa

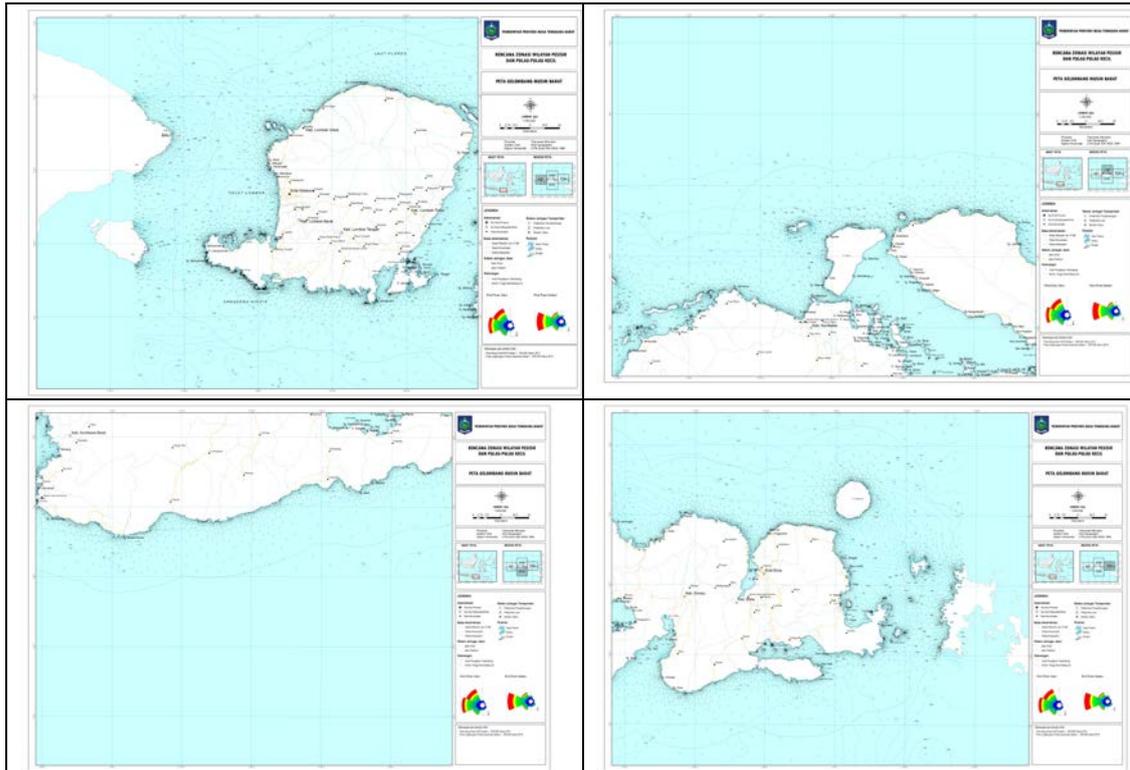
### Gelombang

Gelombang di laut dibedakan menjadi beberapa macam tergantung gaya pembangkitnya, misalnya gelombang angin (ombak), gelombang tsunami, gelombang pasang surut, dan lain-lain. Gelombang, terutama gelombang angin, dapat menimbulkan energi untuk membentuk pantai atau merusak pantai, menimbulkan arus dan transport sedimen dalam arah tegak lurus dan sepanjang pantai. Gelombang tidak hanya sebagai faktor utama mempengaruhi pantai, tetapi juga memiliki energi yang misterius. Ukuran dan bentuk gelombang di perairan pesisir yang dangkal tidak teratur, sedangkan gelombang di laut dalam cenderung lebih teratur dan ada hubungan yang jelas antara periode gelombang dengan panjang gelombang dan kecepatannya. Semakin besar periode gelombang maka panjang gelombang semakin besar dan kecepatannya pun semakin tinggi. Gelombang yang menjalar dari laut dalam menuju pantai akan mengalami perubahan bentuk. Dari bentuk sinusoidal di laut dalam, gelombang menjadi semakin tajam sementara lembah gelombang menjadi semakin landai di laut transisi dan laut dangkal. Pada suatu kedalaman tertentu puncak gelombang sedemikian tajamnya sehingga tidak stabil dan pecah. Setelah pecah gelombang terus menjalar ke pantai, dan semakin dekat dengan pantai tinggi gelombang semakin berkurang.

Kondisi gelombang perairan NTB berdasarkan Stasiun Labuhan Badas (Gambar 6, Gambar 7) dengan tinggi signifikan 0,3-0,8 m sementara tinggi maksimumnya berkisar antara 0,5 -1,3 m, sementara angin berasal dari tenggara dan selatan dengan kecepatan berkisar 2-20 knot.



Gambar 6. Gelombang Timur perairan di Provinsi NTB[8]



Gambar 7. Gelombang Barat perairan di Provinsi NTB[8]

Data Kawasan Rawan Gelombang Pasang menunjukkan beberapa daerah akan tergenang, seperti Tabel 1:

Lokasi	Kawasan Rawan Gelombang Pasang
Kota Mataram	Sepanjang pesisir bagian barat yaitu Sekip dan Ampenan
Kab. Lombok Barat dan Lombok Utara	Sepanjang pesisir Kabupaten Lombok Barat dan Lombok Utara
Kab. Lombok Tengah	Pantai bagian selatan Kabupaten Lombok Tengah yaitu Selong Belanak, Kuta, Tanjung Aan, Gerupuk dan Pantai Awang
Kab. Lombok Timur	Pantai selatan dan timur Kabupaten Lombok Timur yaitu Ekas, Tanjung Ringgit, Tanjung Luar, Labuhan Haji, Labuhan Lombok
Kab. Sumbawa Barat	Pantai bagian barat dan selatan yaitu Maluk, Benete, Tongo, Sejorong, dan Sekongkang
Kab. Sumbawa	Pantai bagian utara dan selatan yaitu Alas, Utan, Badas, Sumbawa Besar, Prajak, Labuhan Moyo Hilir, Empang dan Plampang bagian Selatan, Luyuk dan Teluk Panas, Plampang.
Kab. Dompu	Pantai bagian barat Kabupaten Dompu, yakni Calabai, Nangamiro dan Kilo, serta Pantai Hu'u di pesisir bagian selatan.
Kota Bima	Pantai bagian barat Kota Bima
Kab. Bima	Pantai bagian utara dan timur Kabupaten Bima, yakni Donggo dsk, Sape dan Lambu, Wera, Karumbu dan daerah sekitarnya

### Batimetri

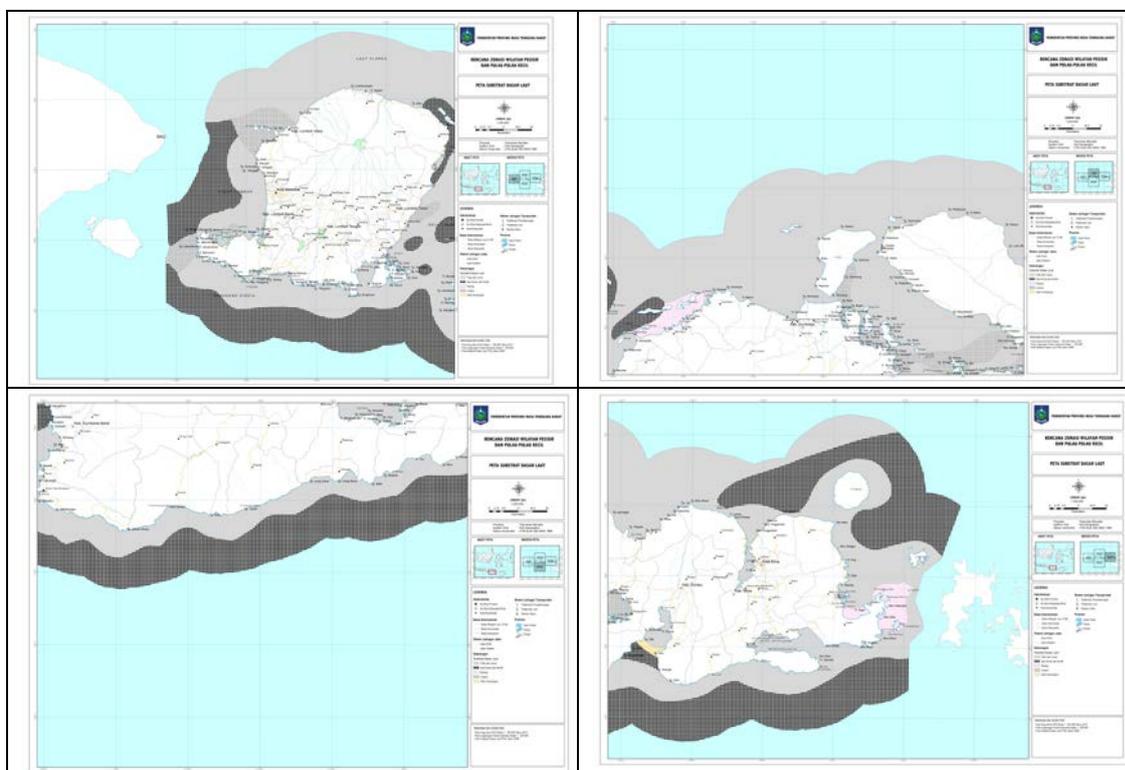
Batimetri adalah kontur kedalaman dasar laut. Informasi batimetri dalam pemilihan tapak PLTN sangat penting diperlukan. Hal ini terkait dengan kesesuaian suatu PLTN akan ditempatkan[10]. Data kedalaman perairan sepanjang pesisir Provinsi NTB diperoleh dari peta Zonasi Kawasan Pesisir NTB, menunjukkan data kedalaman laut perairan di wilayah Provinsi NTB cukup bervariasi. Peta batimetri Provinsi NTB diperoleh data dengan kedalaman cukup untuk ketersediaan pendingin reaktor dalam jarak yang tidak terlalu jauh dari bibir pantai. Persyaratan umum air laut untuk pendingin, apabila semakin dalam perairan laut maka akan semakin baik perairan tersebut sebagai sumber air pendingin. Pada umumnya persyaratan untuk *water intake* adalah pada kedalaman 10-15 meter[10]. Semakin dekat jarak dari garis pantai untuk mendapatkan kondisi batimetri dengan kedalaman 10 – 15 meter, akan semakin baik dari sisi tataletak dan biaya konstruksinya. Disamping juga

diperoleh kondisi sedimentasi ataupun pendangkalan yang relatif tidak membuat perairan keruh.

Berdasarkan data sekunder terkait kedalaman perairan teluk, perairan laut Kawasan Strategis SAMOTA mempunyai karakteristik batimetri yang beragam juga. Batimetri perairan Kawasan Strategis SAMOTA pada sisi barat dan selatan (Kabupaten Sumbawa) tidak memiliki pola keteraturan kedalaman. Hal ini disebabkan karena di wilayah ini terdapat banyak pulau-pulau kecil dan takad-takad. Sedangkan di perairan sisi timur (Kabupaten Dompu) polanya relatif teratur dengan konfigurasi garis garis pantai. Secara umum, kondisi batimetri Kawasan Strategis SAMOTA di wilayah Kabupaten Sumbawa relatif landai dan dangkal dibandingkan dengan kondisi perairan di wilayah Kabupaten Dompu yang lebih curam dan sangat dalam. Kedalaman maksimum perairan Teluk Saleh mencapai 324 m.

### Substrat Dasar Laut

Peta (Gambar 9) berikut menggambarkan peta sebaran substrat sedimen dasar laut di perairan provinsi NTB. Substrat merupakan faktor pendukung untuk media pelekatan karang pada suatu perairan. Substrat yang keras dan bersih dari lumpur diperlukan untuk pelekatan larva karang yang akan membentuk koloni baru. Substrat dasar perairan di perairan bagian Selatan Provinsi NTB terdiri substrat pasir, namun pesisir bagian Utara dominan terdiri pasir halus.



Gambar 9. Peta Tematik Substrat Sedimen[8]

Gambar 9 merupakan peta sebaran substrat sedimen dasar laut di perairan NTB.

### Hasil Identifikasi Potensi Banjir dan Tsunami di Wilayah Pesisir Provinsi NTB:

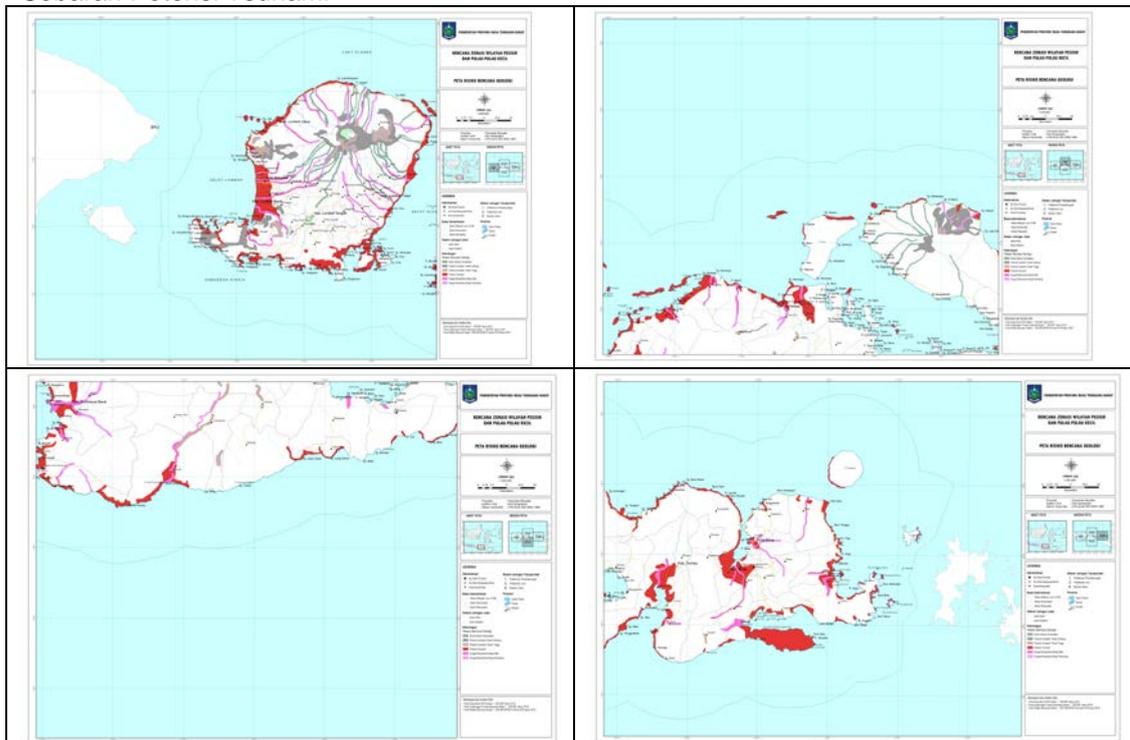
Berdasar data sekunder, identifikasi penentuan tapak potensial PLTN di NTB, potensi terjadi Tsunami di pesisir di NTB cukup besar, seperti tertuang dalam peta tematik Potensi Tsunami berikut:



Gambar 10. Peta Multi Rawan Bencana di Provinsi NTB[8]

Gambar 10 menunjukkan peta sebaran potensi rawan bencana di daerah pesisir perairan provinsi NTB. Sebaran rawan bencana tersebut menunjukkan bahwa di Pulau Lombok hampir semua daerah pesisir punya potensi terhadap rawan banjir dan terjadinya tsunami. Sedangkan di pulau Sumbawa masih ada beberapa daerah pesisir yang bebas dari rawan bencana baik rawan terhadap banjir pantai maupun tsunami.

#### Sebaran Potensi Tsunami



Gambar 11. Peta Rawan Tsunami di Provinsi NTB[8]

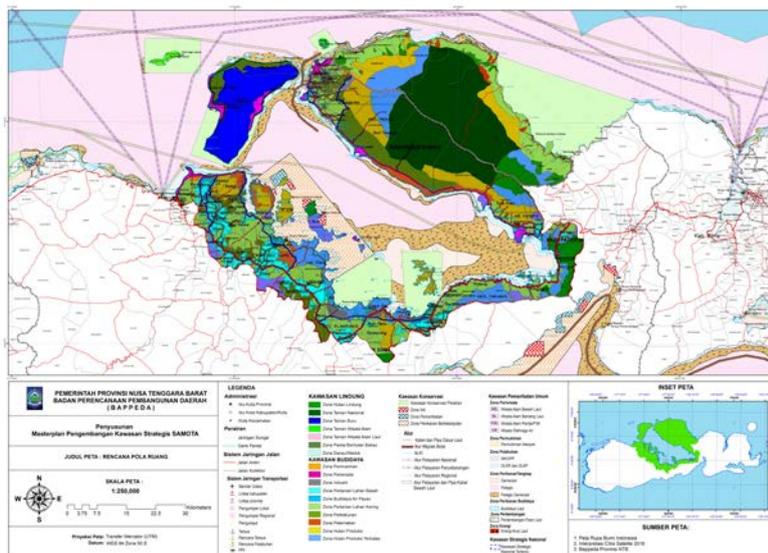
Kawasan Rawan Tsunami

Lokasi	Kawasan Rawan Tsunami
Kab.Lombok Barat	Kawasan pesisir bagian selatan Kabupaten Lombok Barat
Kab. Lombok Tengah	Kawasan pesisir bagian selatan Kabupaten Lombok Tengah yaitu Selong Belanak, Kuta, Tanjung Aan, Gerupuk dan Teluk Awang
Kab. Lombok Timur	Kawasan pesisir selatan Kabupaten Lombok Timur yaitu Ekas, Tanjung Ringgit, Tanjung Luar, Labuhan Haji
Kab. Sumbawa Barat	Kawasan pesisir bagian barat dan selatan yaitu Maluk, Benete, Tongo, Sejorong, dan Sekongkang
Kab. Sumbawa	Kawasan pesisir bagian utara dan selatan yaitu Alas, Utan, Badas, Sumbawa Besar, Prajak, Labuhan Moyo Hilir, Empang dan Plampang bagian Selatan, Lunyuk dan Teluk Panas, Plampang.
Kab.Dompu	Kawasan pesisir bagian barat dan selatan Kabupaten Dompu, yakni Calabai, Nangamiro dan Kilo, serta Pantai Hu'u di pesisir bagian selatan.
Kota Bima	Pantai bagian barat Kota Bima
Kab. Bima	Kawasan pesisir bagian timur dan selatan Kabupaten Bima, yakni Sape dan Lambu, Karumbu dan daerah sekitarnya

Bencana alam dan/atau bencana akibat tindakan manusia, antara lain[11]:

1. Erosi/abrasi pantai yang terjadi antara lain di pesisir Gili Trawangan, Batulayar, Tanjung Karang, Gerung, Sekotong, Gerupuk, Gili Kondo, dan Sambalia.
2. Tsunami terjadi di Provinsi NTB tercatat minimal dua kali yaitu tahun 1815 akibat letusan Gunung Tambora dan pada tahun 1977 akibat gempa tektonik 6.1 SR. Provinsi NTB rawan terhadap ancaman bencana alam tsunami meliputi daerah pantai selatan dan barat Pulau Lombok (Teluk Sepi, Teluk Awang), selatan Sumbawa (Lunyuk dan Labangka, Teluk Cempi dan Teluk Waworada), utara Pulau Sumbawa (Teluk Bima, Teluk Saleh, Labuhan Sumbawa, Alas dsk).
3. Kenaikan muka air laut (sea level rise/SLR) terjadi di wilayah pesisir Kabupaten Lombok Utara yang dicirikan dengan terendamnya sebagian lahan pertanian pangan (sawah) oleh air laut secara permanen.
4. Pencemaran perairan laut yang disebabkan oleh limbah hasil pengolahan pertambangan milik PT Newmont Nusa Tenggara (PT NNT) di Kabupaten Sumbawa Barat.
5. Pencemaran laut perairan Selat Lombok yang dilakukan oleh kapal tanker yang melintas di ALKI II

Identifikasi lebih lanjut untuk peruntukan kawasan pesisir laut dalam Masterplan pola ruang darat dan laut, khususnya pengembangan Kawasan Teluk Saleh, Moyo dan Tambora (SAMOTA). Kawasan tersebut direncanakan sebagai kawasan pariwisata laut, kawasan budidaya, kawasan industri perikanan, transportasi laut, pelabuhan, juga kawasan budidaya mutiara, khususnya di pulau-pulau kecil yang ada di kawasan SAMOTA (Gambar12)[11].



Gambar 12. Pola ruang Darat dan Laut Kawasan SAMOTA[11]

Dengan kondisi daerah dengan peruntukan yang sudah tertuang dalam rencana tata ruang wilayah kawasan pesisir, tentunya pemilihan tapak PLTN di daerah kawasan SAMOTA akan disesuaikan dengan pola ruang di kawasan tersebut SAMOTA. Sehingga untuk studi selanjutnya diperlukan analisis yang lebih dalam dengan mempertimbangkan aspek lain dalam penentuan kesesuaian lahan terhadap tapak PLTN.

Identifikasi awal dari hasil studi data sekunder dan hasil *ground check* lapangan menunjukkan bahwa masih ada kawasan yang sesuai untuk peruntukan tapak PLTN di kawasan SAMOTA yang aman dari bencana banjir dan tsunami. Sedangkan secara keseluruhan pesisir provinsi NTB, kawasan tapak PLTN yang diperoleh menunjukkan kawasan pesisir dari segi potensi bencana, kawasan pesisir provinsi NTB, khususnya pulau Lombok sangat sedikit yang punya potensi sebagai kawasan tapak PLTN. Sedangkan di pulau Sumbawa dimungkinkan masih ada beberapa kawasan yang sesuai sebagai kawasan tapak PLTN. Terkait dengan potensi bahaya dari kejadian Tsunami atau Banjir pantai, kawasan tapak PLTN juga dapat diperoleh kawasan tapak yang sesuai. Tetapi hal ini diperlukan suatu studi untuk menerapkan batasan yang dapat diterima sebagai kawasan tapak PLTN dan studi rekayasa *solution engineering* sehingga tapak PLTN yang aman di kawasan pesisir NTB bisa ditentukan, sehingga perlu identifikasi lebih lanjut. Diperlukan identifikasi lebih lanjut hasil dari analisis kesesuaian tapak PLTN dari beberapa kriteria yang dipertimbangkan dalam penentuan tapak PLTN.

### **KESIMPULAN**

Berdasarkan hasil kajian awal tahap pra survei di wilayah pesisir NTB untuk aspek oseanografi fisik dan potensi bencana banjir serta tsunami, diperoleh daerah yang sesuai sebagai tapak PLTN. Di samping itu, wilayah pesisir di Teluk Saleh yang direncanakan sebagai Kawasan SAMOTA cukup sesuai sebagai tapak PLTN. Tetapi perlu disesuaikan dengan peruntukan setiap Kawasan pesisir yang telah tertuang dalam Masterplan rencana Tata ruang Darat dan Laut. Disamping juga diperlukan identifikasi lebih lanjut untuk dapat dipastikan lokasi tapak aman dari aspek lain yang dipertimbangkan dalam pemilihan tapak PLTN yang aman dan layak.

### **UCAPAN TERIMA KASIH**

Ucapan terimakasih penulis sampaikan kepada Kepala Pusat Kajian Sistem Energi Nuklir (PKSEN)-BATAN yang telah memberi kesempatan untuk melakukan penelitian ini, Pemerintah Provinsi NTB yang telah membantu perolehan data dan Kepala Bidang Kajian Data Tapak yang telah mengarahkan dan memberi masukan dalam penelitian ini.

### **DAFTAR PUSTAKA**

1. PKSEN, Laporan Pra STudi Kelayakan PLTN di Provinsi Nusa Tenggara Barat, Desember 2017.
2. WSP ENVIRONMENT AND ENERGY, Environmental Impact Assessment for The Proposed Nuclear Power Station (Nuclear-1) and Associated Infrastructure (Oceanographic Impact Assessment), Version 2, March 2011.
3. BAPETEN. Peraturan Kepala BAPETEN No. 6 Tahun 2014 Tentang Evaluasi Tapak Instalasi Nuklir Untuk Aspek Meteorologi dan Hidrologi, Badan Pengawas Tenaga Nuklir, Jakarta 2014.
4. IAEA. SSG-18, "Meteorological and Hidrological Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations, IAEA, Vienna, 2011.
5. IAEA. "Site Evaluation for Nuclear Installations", IAEA Safety Standards Series No. NS-R-3 (Rev.1), International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 2016.
6. HENI SUSIATI, YARIANTO SBS., JUNE MELLAWATI, Analisis Ketersediaan Data Oseanografi Dalam Mendukung Evaluasi Tapak PLTN Bangka Barat, Prosiding Seminar Nasional Pengembangan Energi Nuklir V, Jakarta, 2012
7. AIDA HERIATI, EVA MUSTIKASARI DAN M. AL AZHAR, Variabilitas Pola Arus dan Gelombang di Selat Karimata, Jurnal Segara, Volume 11 No. 2, Desember 2015, 125-136
8. DINAS KELAUTAN DAN PERIKANAN, PEMERINTAH PROVINSI NUSA TENGGARA BARAT, Penyusunan Dokumen Final Rencana Zonasi Wilayah Pesisir, Mataram, 2016.

9. DWI HARYO ISMUNARTI, BASKORO R., Kajian Pola Arus di Perairan Nusa Tenggara Barat dan simulasinya Menggunakan Pendekatan Model Matematik, Buletin Oseanografi Marina, Juli 2013, Volume 2, Jakarta, 2013.
10. YARIANTO SBS., Analisis Hidrologi dan Oseanografi dalam Seleksi Tapak PLTN di Wilayah Provinsi Banten, Jurnal pengembangan Energi Nuklir, Volume 8, No. 2, Desember 20016, Jakarta, 2006.
11. BAPPEDA PROVINSI NTB, Peraturan Daerah Provinsi Nusa Tenggara Barat Nomor 3 tahun 2010 Tentang Rencana Tata ruang Wilayah Provinsi Nusa Tenggara Barat, Tahun 2009-2029, Mataram, 2008.
12. DINAS KELAUTAN DAN PERIKANAN, PEMERINTAH PROVINSI NUSA TENGGARA BARAT, Dokumen Final Rencana Zonasi Wilayah Pesisir dan Pulau-pulau Kecil (RZWP3K), Mataram, 2016.
13. BAPPEDA PROVINSI NTB, Masterplan Pengembangan Kawasan Strategis SAMOTA, Mataram, 2017.

#### **DISKUSI/TANYA JAWAB**

##### **1. PERTANYAAN :**

Apakah ada metode lain untuk pemetaan?

##### **JAWABAN :**

Ada, dengan interpretasi data citra satelit, salah satu contohnya

##### **2. PERTANYAAN :**

Mengapa tidak memakai weight?

##### **JAWABAN :**

Setelah data lengkap, akan dilakukan dengan metode pembobotan

## GUTENBERG-RICHTER RECURRENCE LAW ANALYSIS OF RDE SITE AT SERPONG

Yuliasuti, Euis Etty A.

PKSEN-BATAN, Jl. Kuningan Barat, Mampang Prapatan, Jakarta Selatan, 12710  
email: yuliasuti@batan.go.id

### ABSTRACT

#### GUTENBERG-RICHTER RECURRENCE LAW ANALYSIS OF RDE SITE SERPONG.

Gutenberg–Richter (G-R) recurrence law has been widely used for seismic hazard and risk estimates. Parameter  $a$ - and  $b$ - are of importance to develop a seismotectonic model of site. The objective of this paper is to perform calculation of parameter  $a$ - $b$  of G-R law of RDE site Serpong based on the selected earthquake catalog data and additional data from RDE local seismic network. Data used in the calculation were obtained from the earthquake catalogue of Engdahl (1903 – 2007) and BMKG (2009-2015) completed with data acquired from local microseismic network at RDE site Serpong. Parameters  $a$ - and  $b$ - were calculated both by Least Square Regression (LSR) and Maximum Likelihood Estimates (MLE) techniques. Calculation and figure displaying were made by using modified Python 2 code. The earthquakes data were divided into five types of sources based on the event depths. Events occurred at depth of less than 50 km were described as shallow background, and deep background for earthquakes more than 50 km depth. Each earthquake depth zone resulted in different values of  $a$  and  $b$  parameters. Based on the  $b$ -values, it can be concluded that the depth zone of 150-200 km has the highest potential of producing large earthquakes compare to other depth zone.

Keyword: RDE, local seismic network, Gutenberg-Richter

### ABSTRAK

**ANALISIS PERSAMAAN GUTENBERG-RICHTER TAPAK RDE.** Persamaan Gutenberg-Richter (G-R) telah digunakan secara luas untuk analisis bahaya kegempaan dan estimasi risiko kegempaan. Parameter  $a$  dan  $b$  sangat penting dalam pembuatan model seismotektonik di tapak tertentu. Makalah ini bertujuan untuk menganalisis perhitungan parameter  $a$  dan  $b$  dari persamaan G-R di tapak RDE menggunakan katalog gempa terpilih dan katalog gempa yang berasal dari jaringan pemantau gempa lokal RDE. Perhitungan dilakukan menggunakan data yang didapat dari katalog gempa Engdahl (1903 – 2007) and BMKG (2009 – 2015) serta dilengkapi dengan data gempa yang didapat dari jaringan pemantau gempa lokal di tapak RDE. Parameter  $a$  dan  $b$  dari persamaan Gutenberg-Richter dihitung baik menggunakan metode *Least Square Regression* (LSR) dan *Maximum Likelihood Estimates* (MLE). Perhitungan dan penyajian gambar dilakukan menggunakan *code* hasil modifikasi berbasis Python 2. Data gempa dikelompokkan menjadi lima kelompok berdasarkan kedalaman sumber gempa. Kejadian gempa di kedalaman kurang dari 50 km masuk dalam kategori sumber gempa dangkal dan gempa dalam untuk kedalaman lebih dari 50 km. Setiap zona kedalaman menghasilkan nilai parameter  $a$  dan  $b$  yang berbeda-beda. Berdasarkan nilai  $b$ , dapat disimpulkan bahwa zona kedalaman 150-200 km mempunyai potensi tertinggi untuk menghasilkan gempa-gempa besar dibandingkan dengan zona kedalaman lainnya.

Kata kunci: RDE, jaringan pemantauan gempa lokal, Gutenberg-Richter

### INTRODUCTION

In line with the plan to construct the first experimental power reactor in Indonesia, later called as Reaktor Daya Eksperimental (RDE), several site evaluation studies have been performed. The reactor is planned to be constructed at Serpong area. In term of seismic hazard analysis, statistics calculation used on seismological data, provides important parameters in term of frequency-magnitude relationships and the estimation of maximum magnitude. Basic assumption of Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) is that the earthquake recurrence law obtained from past earthquakes is appropriate for the prediction

of future earthquakes[1]. Hadi (2016) performed a study concerning the relation between geological observation data and seismological data at the RDE site[2].

Htwe (2009) citing from Ghosh (2007) indicated that earthquake frequency-magnitude relationship is a way to examine seismic activity in an area[3]. Gutenberg–Richter (G-R) recurrence law has been widely used for seismic hazard and risk estimates[4]. As stated in Han (2015), G-R law emerges in a variety of tectonic settings and depth ranges, in seismic catalogs ranging from a few months to centuries, in natural as well as induced seismicity and in seismic hazard studies[5]. Ortega (2005) applied the G-R law at the Basin of Mexico using the seismic data of 13 stations at the Valley of Mexico seismic network (RSVM)[6]. This paper focused on using the G-R law on seismic hazard analysis of RDE site by utilizing the available catalogue data from Engdahl and completed with the earthquake catalogue data obtained from local seismic network.

Six seismographs have been installed at the site and around the site to monitor the seismic activity. This monitoring activity referred to the national regulation of nuclear installation safety stated in the BAPETEN Chairman Regulation No. 8 year 2013 regarding Site Evaluation of Nuclear Power Reactor for Seismic Aspect. Based on IAEA guide, the operation of seismic network should have a long period of observation in order to acquire reliable data for seismotectonic interpretation (IAEA, 3.30, 2010). The data obtained from the seismic network can improve the seismic hazard analysis at the site and eventually ensure the safety operation of the reactor.

Aside from G-R recurrence law, one common alternative is the characteristic earthquake model which proposes that some faults have expected rupture rate. Parsons (2009) stated that “The characteristic model is derived from paleoseismic observations (Schwartz and Coppersmith, 1984; Wesnousky, 1994; Hecker and Abrahamson, 2004) and has great appeal for forecasting because if the same event has occurred repeatedly in the past, there is implied predictability”[7].

Nevertheless, due to its simplicity, G-R recurrence law has been chosen as the method for calculating the frequency-magnitude relationship at RDE site Serpong. The objective of this paper is to perform calculation of parameter  $a$ - $b$  of G-R law of RDE site Serpong based on the selected earthquake catalog data and data addition from local seismic network. In order to achieve the objective, Least Square Regression (LSR) and Maximum Likelihood Estimate (MLE) were employed. Furthermore, the calculated  $a$ - $b$  parameters of G-R law could be utilized in order to develop the seismotectonic model of RDE site.

## MICROEARTHQUAKE MONITORING CHARACTERISTICS

The installed seismometers consist of two type of seismometers. Broadband seismometers are installed at three stations at RDE site using GeoSig seismometer. The installation distance for one station to another is approximately 1 km. In addition, there are three more stations installed at the radius of 5 km from the site as described in Figure 1.

Performance of the microearthquake monitoring network has been evaluated based on their data availability throughout the year 2017. From the observation, data availability of the network reached 66% from Januari-November 2017. Data availability is strongly influenced by some factor such as the power source availability because the main power source is coming from the sun energy using solar panel.

Since Januari to November 2017, there were 169 earthquake events recorded as shown in Figure 1. Within the 25 km radius of RDE site, there were four events recorded with the magnitude range of 2.5 – 2.9 (Mw) at the depth of 22-150 km. The biggest earthquake recorded was on September with magnitude of 6.4 at the depth of 650 km and the approximate epicenter distance of 600 km from the site.



Figure 1 Map of Local Microearthquake Station Monitoring of RDE Site.

## METHODOLOGY

Gutenberg-Richter law described the relationship between frequency (number of earthquake events per year) and magnitude as showed in Equation (1) (Gutenberg & Richter, 1954):

$$\log N (M_{min}) = a - bM_{min} \quad (1)$$

where  $N$  is the cumulative number of earthquake with magnitude larger than  $M_{min}$ ,  $a$  and  $b$  are constants. Han (2015) explained that parameter  $a$  implied seismic activity of the region which depends on the size area, observation period and largest seismic magnitude[5]. Whereas, Wiemer & Wyss (2002), describe parameter  $a$  the productivity of a volume in this case earthquake events[8] and stated that parameter  $b$  describes the relative size distribution of an earthquake events[9].

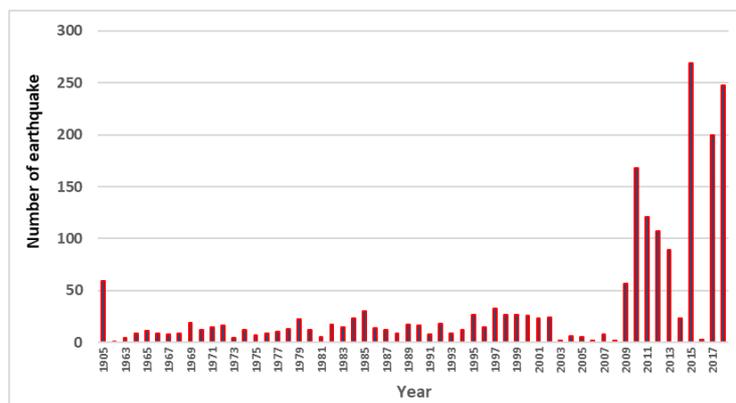
The b-value can be obtained through several methods. Two of the most common methods are using the least squared regression (LSR) and Maximum Likelihood Estimate (MLE). Both of the methods were based on fitting process. LSR method obtained the b-value by performing least square linear regression of  $\log N$  versus  $M$ . MLE method gives a less biased and less uncertain estimate than the weighted least square method[9].

Calculation of  $a$ - $b$  value were performed using modified Python 2 script generated by Jonathan Griffin (Australia-Indonesia Facility for Disaster Reduction) on 23 August 2010. The script was an open source script shared at GitHub. Instead of being imported as a function, the calculation was performed as a single embedded file. Earthquake catalogue as an input was expected to have at least arrays of magnitude and years of earthquake events. The input file was saved as '.txt' file.

Tectonic environment refers to the state of stress and the seismological parameters of the crust that have a significant impact to the amplitude and attenuation of strong ground motion. Thus, the earthquakes data were divided into four type of sources based on the earthquake depth. The number of earthquakes recorded each specified depth were shown in Table 1. Data used in the calculation was obtained from the earthquake catalogue data of Engdahl (1903 – 2007) and BMKG (2009-2015), and completed with data acquired from local microseismic network at RDE site Serpong (Dec 2016 - 2017). By considering the magnitude of completeness, period of observation was chosen as of 1900 to 2017. All the data magnitude were converted into the  $M_w$  magnitude scale unit. Figure 2 described the number of earthquake per year at the 300 km radius from the site.

**Table 1** Number of earthquakes

Depth (km)	Number of earthquakes	Minimum magnitude ( $M_{min}$ )	Maximum magnitude ( $M_{max}$ )	Magnitude variance
0-50	1397	2.19	7.3	0.55
50-100	374	2.78	7.46	0.46
100-150	99	2.56	6.35	0.56
150-200	47	3.23	6.33	0.202
> 200	61	3.38	7.5	0.82



**Figure 2** Number of earthquake per year.

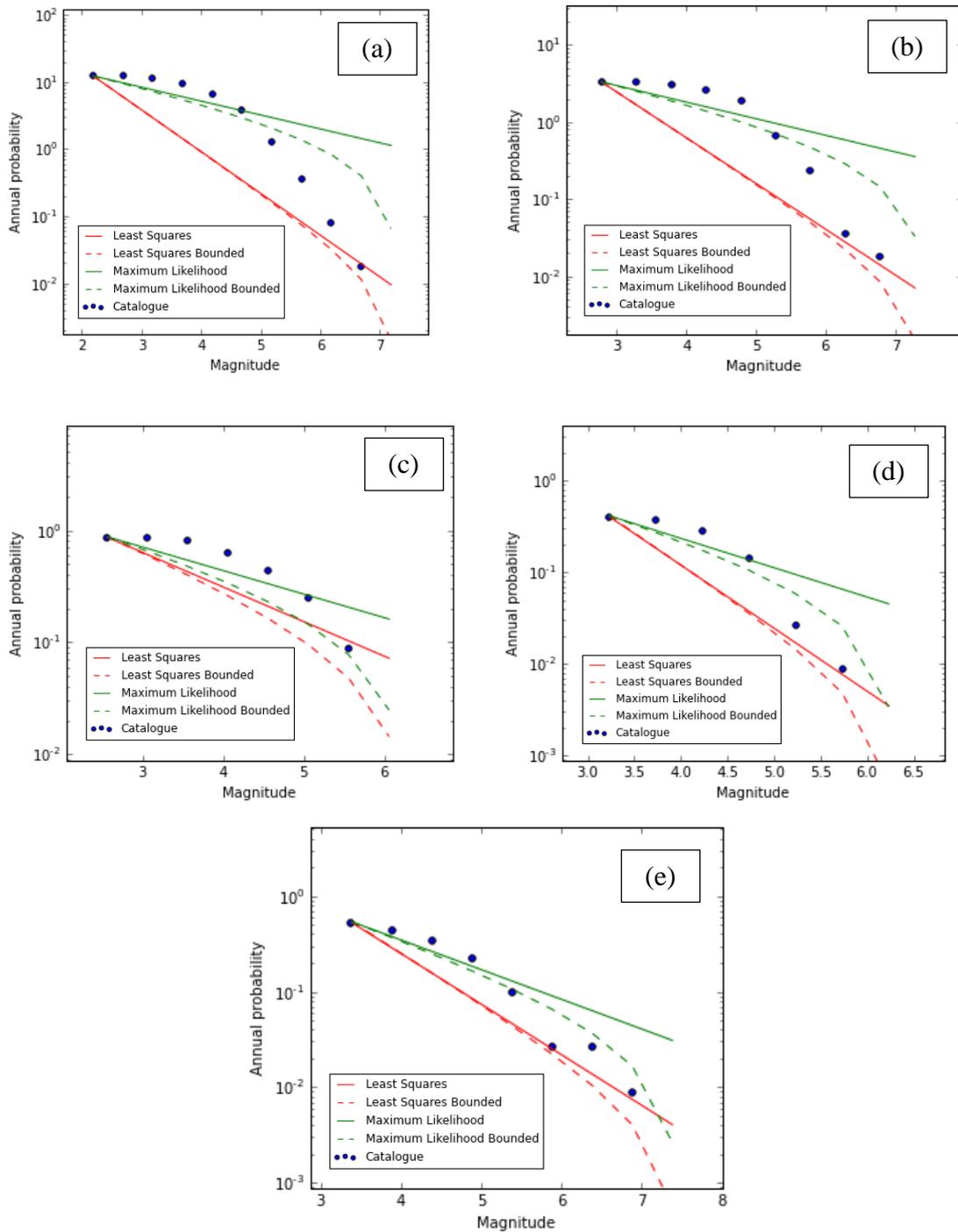
**RESULT AND DISCUSSION**

Given the data sets mentioned in the previous section, the output of  $a$ - $b$  calculation is presented in Table 2. As shown in Table 2, each earthquake depth zone resulted in different values of  $a$  and  $b$  parameters. Minimum  $a$ -value was produced at the depth bin of 100-150 km and maximum  $a$ -value was made at the depth zone of less than 50 km. From the table it clearly shown that the biggest  $a$ -value was acquired from the earthquakes at the depth range of 0-50 km. The  $a$ -value is a variable that measures the number of events ( $N$ ) in a sample with given  $b$  and certain minimum magnitude,  $M_{min}[10]$ . Thus, the  $a$ -value is highly influenced by the  $b$ -value and the value of  $M_{min}$ . This agreed with the result in Table 2 where the maximum  $a$ -value is determined by the highest  $b$ -value, the largest earthquake event numbers and the lowest minimum magnitude. The  $a$ -value relatively changed depends on the observation period and the average earthquake magnitude[11].

Meanwhile, the lowest  $b$ -value was produced at the depth zone of 100-150 km using LSR technique and at the depth of 0-50 km using the MLE technique. The highest  $b$ -value was obtained at the depth zone of 150-200 km both using the LSR and MLE techniques. Table 2 indicates  $a$ - and  $b$ -value drop at the depth zone of 100-150 km. As mentioned before that one of the influence factor of  $a$ -value is the  $b$ -value itself. Therefore, it is important to analyze further about the  $b$ -value.

**Table 2**  $a$ - $b$  value for each depth zone

Depth (km)	$a$		$b$	
	(LSR)	(MLE)	(LSR)	(MLE)
0-50	3.001	3.6	0.622	0.207
50-100	2.637	3.17	0.594	0.215
100-150	0.905	2.53	0.309	0.210
150-200	2.113	2.71	0.689	0.321
> 200	1.718	2.84	0.529	0.31



**Figure 3 Annual probability vs magnitude for each depth zone: (a) 0-50km, (b) 50-100km, (c) 100-150km, (d) 150-200km.**

In order to analyze the  $b$ -value, one should understand that the linearity relationship between  $\log N$  and  $M$  of G-R recurrence law holds only for magnitudes in a certain range. The  $b$ -value indicates the relative ratio of small and big earthquake magnitude[12]. Thus, a few large earthquake on the catalogue could give a significant impact to the resulted  $b$ -value. Given the magnitude variance data as shown in Table 1, it is obvious that at depth zone of 100-150 km the variance is relatively big and might be one of the reason that caused a low  $b$ -value when using LSR technique. Moreover,  $b$ -value directly described the tectonic characteristic of an area[11]. In a more detailed explanation, Wyss (1973) stated that the  $b$ -value is closely related to the stress-level of earth crust and low  $b$ -values might indicate high

local tectonic stresses[8]. Thus, the resulted low  $b$ -value might correlated with the subduction existence. Although some geodynamic data of the upper earth crust are needed in order to support this analysis.

From Table 2, the two techniques delivered different  $b$ -values. Sinadovski and Mccue (2001) explained that LSR overestimates the frequency of large events and underestimates the frequency of moderate size events[13]. In addition to that, Sinadovski and Mccue (2001) stated that MLE yields a more robust value when the number of infrequent large earthquake changes. Table 2 showed that MLE gave lower  $b$ -values and a closer estimation to the observed data (shown in Figure 3) compared to LSR technique. Nevertheless, Both LSR and MLE techniques showed an agreement that at the depth zone of 150-200 km the  $b$ -value reached maximum value.

Figure 3 shows that the earthquake events trend were far from linear fit and fit much better with the maximum likelihood fitting technique (show in green line). Non-linear fit occurred because the magnitude variance data are quite high which made the earthquake frequency decreases non-linearly. This could also be an indication of catalog incompleteness and short period of observation. Based on the analysis, MLE provides a more confidence value compare to the LSR technique.

## CONCLUSION

Calculation of  $a$ - and  $b$ -value of Gutenberg-Richter recurrence law of RDE site at Serpong has been performed. Data used in the calculation were obtained from the earthquake catalogue data of Engdahl (1903 – 2007) and BMKG (2009-2015) and completed with data acquired from local microseismic network at RDE site Serpong (Dec 2016 - 2017). Based on the  $b$ -values, it can be concluded that the depth zone of 150-200 km has the highest potential of producing large earthquakes compare to other depth zone. Thorough investigation is needed to understand the decreasing  $b$ -value at depth zone of 100-150 km.

## ACKNOWLEDGEMENT

Funding for this research was provided by DIPA PKSEN 2018 and supported by the Ministry of Research, Technology and Higher Education under grant of Insentif Riset Sistem Inovasi Nasional number 01/INS-1/PPK/E4/2018. This support is gratefully acknowledged. We are also thankful to BMKG for providing necessary data and analysis. The author is also grateful to Jonathan Griffin (Australia-Indonesia Facility for Disaster Reduction) for sharing the calculation code.

## REFERENCES

- [1] S. Siddique, "Gutenberg-Richter recurrence law to seismicity analysis of Bangladesh," in *IABSE-JSCE Joint Conference on Advances in Bridge Engineering-III*, 2015.
- [2] H. Suntoko and S. Supartoyo, "Konfirmasi Patahan Permukaan Berdasarkan Data Geologi Dan Data Gempa Daerah Kawasan Puspipetek Serpong," *J. Pengemb. Energi Nukl.*, vol. 18, no. 1, pp. 1–10, 2016.
- [3] Y. Htwe, "Gutenberg-Richter Recurrence Law to Seismicity Analysis of Southern Segment of the Sagaing Fault and Its Associate Components," *174.122.150.229*, pp. 1026–1029, 2009.
- [4] F. A. Nava, V. H. Márquez-Ramírez, F. R. Zúñiga, L. Ávila-Barrientos, and C. B. Quinteros, "Gutenberg-Richter  $b$ -value maximum likelihood estimation and sample size," *J. Seismol.*, vol. 21, no. 1, pp. 127–135, 2017.
- [5] Q. Han, L. Wang, J. Xu, A. Carpinteri, and G. Lacidogna, "Chaos, Solitons and Fractals A robust method to estimate the  $b$ -value of the magnitude – frequency distribution of earthquakes," *Chaos, Solitons and Fractals*, vol. 81, pp. 103–110, 2015.
- [6] R. Ortega and L. Quintanar, "A study of the local magnitude scale in the Basin of Mexico: Mutually consistent estimates of log  $A_0$  and ground-motion scaling," *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 95, no. 2, pp. 605–613, 2005.
- [7] T. Parsons and E. L. Geist, "Short Note Is There a Basis for Preferring Characteristic Earthquakes over a Gutenberg – Richter Distribution in Probabilistic Earthquake

- Forecasting ?," *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 99, no. 3, pp. 2012–2019, 2019.
- [8] S. Wiemer and M. Wyss, "Mapping spatial variability of the frequency-magnitude distribution of earthquakes," *Adv. Geophys.*, vol. 45, no. C, 2002.
- [9] M. A. X. Wiemer, STEFAN and Wyss, "FREQUENCY-MAGNITUDE DISTRIBUTION OF EARTHQUAKES," in *Advances in Geophysics*, vol. 45, 2002, pp. 259–302.
- [10] M. Wyss, "Towards a Physical Understanding of the Earthquake Frequency Distribution," *Geophys. J. Int.*, vol. 31, no. March, pp. 341–359, 1973.
- [11] J. T. Simamora and E. L. Namigo, "Pemetaan Magnitude of Completeness ( M c ) untuk Gempa Sumatera," *J. Fis. Unand*, vol. 5, no. 2, pp. 179–186, 2016.
- [12] J. W. Baker, "An Introduction to Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA)," *Stanfordedu*, p. 77, 2015.
- [13] C. Sinadinovski and K. F. McCue, "Recurrence Relationships for Australian Earthquakes," in *Proceedings of the Australian Earthquake Engineering Society Conference*, 2006, no. January 2001.

**DISKUSI/TANYA JAWAB :**

**1. PERTANYAAN :**

Mengapa nilai b relative lebih kecil pada zona kedalaman 100-150 km?

**JAWABAN :**

B-value pada persamaan Guttenberg-Richter menggambarkan nilai potensi kegempaan di daerah yang dituju. Nilai b yang relatif rendah di zona kedalaman 100-150 km menunjukkan bahwa potensi kegempaan di zona kedalaman tersebut relatif lebih rendah.

Halaman ini sengaja di kosongkan

## ANALISIS FK BEAMFORMING UNTUK PENENTUAN ARAH BACK AZIMUTH GEMPA DI STASIUN SEISMIK RDE

Yuni Indrawati<sup>1</sup>, Yuliasuti<sup>1</sup>, Rian Amukti<sup>2</sup>

<sup>1</sup> PKSEN BATAN, Jl. Kuningan Barat, Mampang Prapatan, Jakarta Selatan, 12710

<sup>2</sup> Universitas Islam Bandung, Jl. Taman Sari No 1, Bandung Wetan, Bandung, 40116

email: yuni.indrawati@batan.go.id

### ABSTRAK

**ANALISIS FK BEAMFORMING UNTUK PENENTUAN ARAH BACK AZIMUTH GEMPA DI STASIUN SEISMIK RDE.** Penentuan lokasi episenter gempa yang tepat membuat interpretasi aspek kegempaan tapak calon reaktor nuklir menjadi akurat. Parameter-parameter dasar dalam metode penentuan lokasi gempa umumnya masih mempunyai tingkat kesalahan cukup tinggi. Pemilihan parameter dasar yang keliru akan menyebabkan penentuan lokasi episenter tidak akurat. Adanya *cross-check* menggunakan metode lain perlu dilakukan untuk memastikan parameter yang digunakan adalah benar. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui arah *back azimuth* penjalaran gelombang seismik yang terekam di stasiun seismik RDE sehingga dapat digunakan untuk membantu dalam penentuan lokasi episenter gempa. Metode beamforming dapat digunakan untuk melihat *back azimuth* dan *slowness* yang bergantung pada penjalaran gelombang seismik yang datang. Besar dan konfigurasi *array* serta teknik beamforming sangat menentukan keakurasian hasil yang diperoleh. Korelasi antara analisis beamforming dengan metode konvensional penentuan lokasi gempa membuat informasi episenter yang diperoleh semakin akurat. Penelitian ini menggunakan teknik beamforming dengan analisis *frequency-wavenumber (fk)* diaplikasikan untuk mengetahui arah gempa tanggal 23 Januari 2018 dari stasiun seismik RDE. Data rekaman merupakan data komponen vertikal seismometer dari empat stasiun RDE dengan konfigurasi *triangular array*. Analisis *fk* beamforming dilakukan dengan menggunakan Obspy. Pemrosesan menggunakan input parameter yang berbeda dilakukan untuk melihat konsistensi dari hasil. Hasil analisis pemrosesan pertama menunjukkan arah *back azimuth* antara  $210^{\circ}$  –  $225^{\circ}$  dengan besar *slowness* berkisar 2,6 s/deg hingga 2,7 s/deg. Hasil analisis pemrosesan kedua menunjukkan arah *back azimuth* antara  $222^{\circ}$  –  $234^{\circ}$  dengan besar *slowness* berkisar 2,4 s/deg hingga 2,56 s/deg.

Kata kunci: Analisis *fk*, Beamforming, *Back Azimuth*, RDE

### ABSTRACT

**BEAMFORMING FK ANALYSIS FOR DETERMINING THE DIRECTION OF EARTHQUAKE BACK AZIMUTH IN RDE SEISMIC STATIONS.** Determining the exact location of earthquake epicenter makes the interpretation of seismic aspects of the prospective nuclear reactor site more accurate. The basic parameters in the method of determining the location of the earthquake still have a high enough error level. Incorrect basic selection parameters will cause inaccurate epicenter location determination. Cross-check using other methods is required to ensure the correct parameter. The purpose of this study is to determine the direction of seismic wave propagation back azimuth which is recorded in RDE seismic stations that can be used to assist in determining the location of earthquake epicenter. The beamforming method can be used to see the azimuth and slowness which are dependent on the seismic wave propagation. Seismic stations size and configurations of array and beamforming techniques greatly determine the accuracy of the results. The correlation between beamforming analysis and conventional methods creates accurate epicenter information. This study uses beamforming technique with analysis of frequency wave numbers (*fk*) to determine the direction of the earthquake occurred on Januari 23 2018 from RDE station. Recorded data is vertical seismometer component data from four RDE seismic stations with a triangular array configuration. *Fk* beamforming analysis is done using Obspy. The processing using different input parameters were done to see the consistency of the results. The results of the first processing show that the back azimuth direction between  $210^{\circ}$  -  $225^{\circ}$  with slowness ranges

from 2.6 s/deg to 2.7 s/deg. The results of the second processing show that the back azimuth direction between  $222^{\circ}$  -  $234^{\circ}$  with slowness ranges from 2.4 s/deg to 2.56 s/deg.

Keyword: fk analysis, beamforming, Back Azimuth, RDE

## PENDAHULUAN

Berdasarkan Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 8 tahun 2013 tentang aspek kegempaan [1] bahwa dalam mengevaluasi bahaya kegempaan terhadap tapak instalasi nuklir dan wilayah sekitarnya maka diperlukan pengumpulan informasi dan investigasi kegempaan. Rencana pembangunan Reaktor Daya Eksperimental (RDE) di Kawasan Puspipstek Serpong memerlukan kajian kegempaan yang akurat dan komprehensif. Di wilayah sekitar Serpong terdapat tiga patahan aktif yaitu sesar Cimandiri, sesar Lembang, dan sesar Baribis [2]. Hal ini mengindikasikan bahwa daerah ini merupakan daerah seismotektonik yang cukup kompleks. Meskipun hasil identifikasi potensi patahan di lapangan menunjukkan bahwa tidak ada patahan kapabel dan bukti patahan permukaan di sekitar tapak RDE dalam radius 5km [3] dan kondisi tektonik yang relative stabil ( $< 0,005$  mikrostrain) [4], aktivitas kegempaan di area RDE perlu dipantau untuk menjamin keselamatan RDE.

Penentuan lokasi episenter gempa yang tepat membuat interpretasi aspek kegempaan tapak menjadi akurat. Selama ini penentuan lokasi gempa menggunakan metode konvensional dengan beberapa parameter dasar yang masih mampu nyai kemungkinan kesalahan cukup tinggi. Umumnya asumsi model kecepatan umum digunakan sebagai parameter dasar dalam analisis penentuan lokasi gempa. Bagaimanapun setiap tempat mempunyai keadaan geologi bawah permukaan yang berbeda sehingga model kecepatannya pun berbeda. Jika jarak sumber gempa jauh maka akan memberikan variasi kecepatan gelombang seismik yang tidak tepat sehingga posisi hiposenter menjadi tidak akurat hingga puluhan kilometer. Adanya *cross-check* menggunakan metode lain perlu dilakukan untuk memastikan parameter dasar yang digunakan adalah benar. Pengetahuan mengenai arah datang gelombang gempa dapat membatasi interpretasi mengenai penentuan lokasi gempa.

Salah satu metode yang dapat digunakan untuk mengetahui arah datang gelombang seismik gempa adalah metode beamforming. Metode beamforming menggunakan konfigurasi *array* untuk meningkatkan sensitivitasnya dalam deteksi sumber gempa. Metode ini menekan *noise* sehingga meningkatkan *signal to noise ratio* (SNR) dengan cara menjumlahkan sinyal yang koheren dari *array*. Prinsip beamforming untuk berbagai nilai *slowness* direpresentasikan dengan menggunakan analisis fk.

Metode beamforming telah diaplikasikan pada data rekaman stasiun *array* Grafeberg (GRF) dengan sumber gempa di daerah Danau Tanganyika, Tanzania [5]. Hasil yang diperoleh menunjukkan tidak ada sinyal yang terdistorsi dengan metode beamforming *delay and sum*. Penjumlahan biasa menghasilkan amplitudo kecil dengan bentuk gelombang terdistorsi sedangkan penjumlahan dengan menggeser *trace* menghasilkan bentuk gelombang dengan amplitudo tinggi yang lebih jelas.

Dengan mengaplikasikan metode beamforming pada calon tapak reaktor nuklir maka akan membantu dalam mengurangi kesalahan dalam penentuan lokasi sumber gempa. Adanya penilaian aspek kegempaan perlu dilakukan untuk memastikan calon tapak RDE aman. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui arah *back azimuth* penjalaran gelombang seismik yang terekam di stasiun seismometer RDE sehingga dapat digunakan untuk membantu dalam penentuan lokasi episenter gempa. Selain itu, untuk mendapatkan nilai *back azimuth* yang akurat pemrosesan diulangi dengan menggunakan input parameter yang berbeda untuk melihat konsistensi arah *back azimuth* gempa di stasiun seismik RDE.

## METODE FK BEAMFORMING

Gelombang seismik yang datang menjalar melalui medium dapat diidentifikasi dengan menggunakan parameter sudut insiden ( $i$ ) dan *back azimuth* ( $\theta$ ). Sudut insiden merupakan sudut vertikal antara stasiun dengan sumber gempa, sedangkan *back azimuth* merupakan sudut dari stasiun ke episenter gempa dari arah utara searah jarum jam. Umumnya parameter yang digunakan dalam penjalaran gelombang bukan sudut insiden melainkan *slowness* ( $u$ ). Dengan mengetahui besar sudut insiden dan kecepatan medium bawah permukaan  $v_0$ , nilai *horizontal slowness* dapat diketahui.

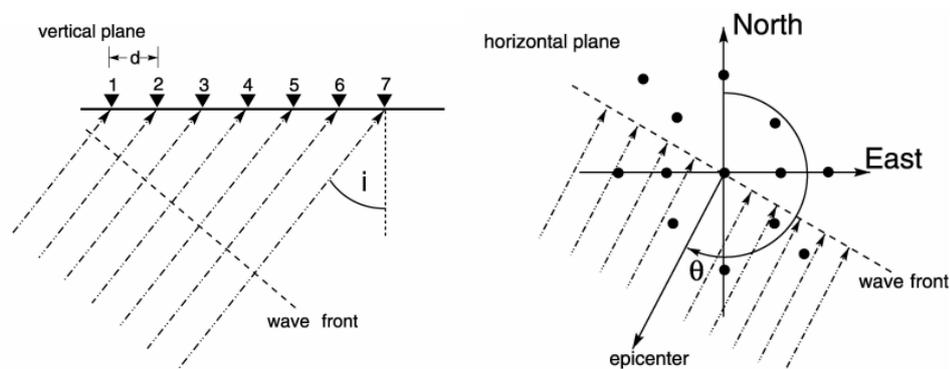
$$u = \frac{1}{v_{app}} = \frac{\sin i}{v_0} \quad (1)$$

Kombinasi antara *horizontal slowness* dan *back azimuth* akan menghasilkan vektor *slowness* yang merupakan arah dari perambatan gelombang yang didefinisikan sebagai

$$u = \frac{1}{v_0} (\sin i \sin \theta, \sin i \cos \theta) \quad (2)$$

Informasi arah *back azimuth* dan *slowness* penting untuk menentukan fase gelombang seismik, membedakan antara gelombang yang mempunyai *origin time* berbeda atau gelombang dari sumber gempa yang berbeda, dan meningkatkan rasio SNR dengan cara *stacking* berdasarkan variasi fase *slowness* [5].

Data seismik yang terekam dalam suatu stasiun masih mengandung derau yang dapat membuat kesalahan dalam interpretasi. Reduksi derau dilakukan untuk mendapatkan hasil yang dapat dipercaya. Penggunaan teknik *array* dapat meningkatkan SNR dengan cara mengekstrak bagian koheren dalam sinyal yang datang, sehingga bagian yang tidak koheren atau *noise* dapat diminimalkan. Teknik *array* mengasumsikan bahwa kedatangan gelombang yang datang ke dalam *array* berupa *plane wave*. Asumsi ini berlaku jika sumber gempa mempunyai jarak yang jauh dari *array*. Sketsa kedatangan gelombang seismik dari sumber menuju stasiun *array* dapat ditunjukkan pada gambar 2.



Gambar 1. Bidang vertikal muka gelombang insiden yang melewati *array* pada sudut insiden (a) Sketsa bidang horisontal kedatangan gelombang bidang insiden dengan *back azimuth* (b) [5]

Salah satu teknik *array* yang dapat digunakan untuk memisahkan sinyal koheren dengan noise dari sinyal yang terekam adalah metode beamforming. Teknik dari metode ini adalah *delay and sum* [5, 6]. Masing-masing stasiun dalam *array* akan mempunyai waktu tiba gelombang yang berbeda (*delay time*) karena perbedaan nilai *slowness* dan *back azimuth* serta jarak antara stasiun dengan pusat *array* [5]. Perhitungan *delay time* dilakukan di setiap stasiun untuk proses *array beam*. *Delay time* dapat bernilai positif maupun negatif bergantung pada posisi relatif stasiun yang dihitung terhadap stasiun acuan dalam *array*. *Beam array* sebanyak  $M$  dengan data seismik di stasiun  $i$  pada waktu  $t$  akan menghasilkan sinyal yang sejajar setelah digeser dan trace seismik yang dijumlahkan akan menghasilkan noise yang inkoheren, maka hasil beam dapat didefinisikan seperti pada persamaan 3.

$$b(t) = s(t) + \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M n_i (t + d_i) \quad (3)$$

Metode beamforming membuat semua stasiun dalam *array* menangkap sinyal dalam kecepatan dan azimuth beresolusi tinggi dibanding *cross correlation* antar pasangan stasiun dan analisis polarisasi [7]. Besar dan konfigurasi *array* serta teknik beamforming sangat menentukan keakuratan hasil yang diperoleh. Semakin banyak stasiun seismometer yang digunakan maka kecepatan fase yang diperoleh makin akurat [8]. Korelasi antara analisis beamforming dengan metode konvensional penentuan lokasi gempa membuat informasi episenter yang diperoleh semakin akurat.

Salah satu metode analisis yang menggunakan dasar beamforming adalah analisis  $f_k$ . Pengaplikasian beamforming menggunakan pendekatan  $f_k$  lebih mudah dalam menangani noise spasial [6]. Analisis  $f_k$  dapat dilakukan dengan panjang data dalam hitungan detik karena waktu window yang panjang akan mengandung beberapa vektor *slowness* yang dapat menyebabkan ambiguitas dalam melakukan interpretasi [5]. *Slowness* dalam  $f_k$  dikalkulasikan dengan Persamaan 4.

$$|k| = (k_x^2 + k_y^2)^{1/2} = \frac{2\pi}{u_s} = \frac{\omega}{v_s} \quad (4)$$

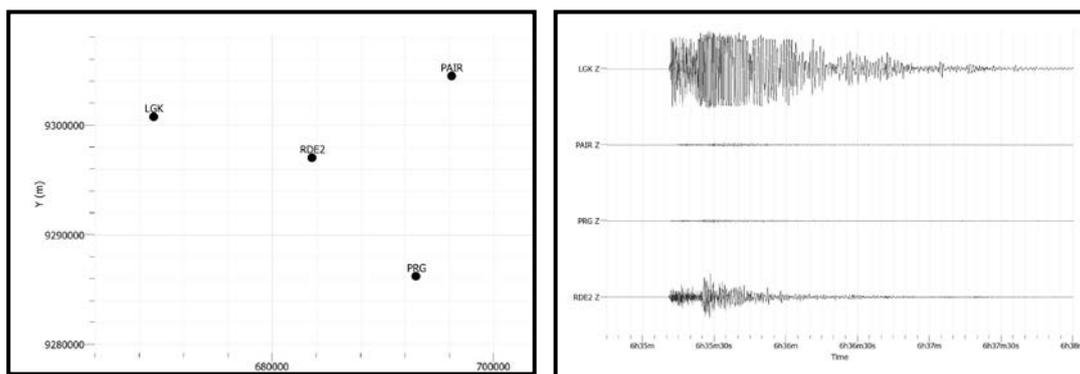
Sedangkan *back azimuth* dapat dihitung melalui Persamaan 5.

$$\theta = \tan^{-1}(k_x/k_y) \quad (5)$$

Hasil dari analisis fk adalah energi total yang terekam di *array*. Metode ini mencari energi tertinggi dari *slowness* dan *back azimuth* hasil korelasi antara model sintetis dan model observasi. Besar energi dalam fk digambarkan dalam sistem koordinat polar yang disebut dengan diagram fk. *Back azimuth* ditunjukkan dalam sumbu azimuthal dan *slowness* ditunjukkan dalam sumbu radial.

## METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan teknik beamforming dengan analisis *frequency wavenumber* (fk) yang terbatas untuk sumber gempa yang kuat. Analisis fk beamforming diaplikasikan untuk mengetahui arah gempa tanggal 23 Januari 2018 dari stasiun seismometer RDE. Stasiun yang digunakan dalam penelitian ini berjumlah 4 stasiun dengan konfigurasi mendekati *triangular array*. Input data berupa rekaman komponen vertikal seismometer yang menunjukkan sinyal gempa yang kuat. Persebaran stasiun seismik RDE dan *raw data* yang digunakan ditunjukkan pada gambar 1. Informasi stasiun seismometer mengenai koordinat dan jenis alat yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 1. Masing-masing seismometer yang digunakan mempunyai spesifikasi yang berbeda termasuk banyaknya sampling yang digunakan. Sebelum melakukan pengolahan perlu dilakukan *resampling* untuk menyamakan *sampling frequency*.



Gambar 2. Persebaran 4 stasiun RDE dengan konfigurasi *triangular array* (kiri) dan *raw data* keempat stasiun RDE pada tanggal 23 Januari 2018 pukul 06.34.45 UTC – 06.38.00 UTC.

Tabel 1. Stasiun seismometer dalam konfigurasi *array* seismometer RDE

No	Nama Stasiun	Lintang (°)	Bujur (°)	Jenis Alat
1	RDE 2	6,36 LS	106,66 BT	Geosig SP
2	LGK	6,32 LS	106,53 BT	Quantera
3	PAIR	6,29 LS	106,77 BT	Quantera
4	PRG	6,45 LS	106,77 BT	Quantera

Analisis fk beamforming dilakukan dengan menggunakan Obspy. Analisis fk beamforming menggunakan *script* Python yang diaplikasikan pada data peledakan pencakar langit AGFA di Munich [9]. Koreksi instrumen diaplikasikan pada pemrosesan untuk melihat hasil analisis yang telah memasukkan faktor alat. Input parameter yang digunakan berupa sensitivitas, *pole*, *zero*, dan gain dari alat serta informasi posisi stasiun berupa lintang, bujur, dan elevasi.

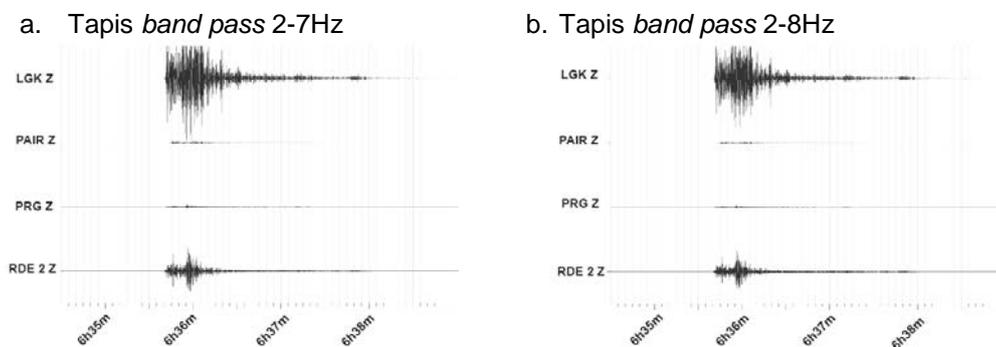
Tahapan kegiatan meliputi pencarian data gempa kuat. Pemotongan dan penapisan pada *event* gempa diperlukan untuk mengurangi noise dan mendapatkan sinyal gempa yang jelas. Beberapa parameter yang ditentukan adalah input maksimal *slowness*, jumlah grid *slowness*, jumlah fraksi dalam plot diagram, *windowing*, *filter*, waktu mulai dan waktu akhir.

Pengolahan dilakukan sebanyak dua kali untuk melihat konsistensi *back azimuth* yang diperoleh dengan mengubah beberapa parameter. Pengolahan pertama menggunakan parameter awal yaitu input *slowness* sebanyak 3, *slowness grid* 30, jumlah fraksi 24,

*windowing* 2, filter yang digunakan yaitu *band pass* dari 2 Hz hingga 7 Hz, waktu mulai pada pukul 06.35.10 UTC dan waktu akhir sinyal 06.35.50 UTC. Pengolahan kedua menggunakan parameter awal yaitu input *slowness* sebanyak 4, grid *slowness* 25, jumlah fraksi 30, *windowing* 10, filter yang digunakan yaitu *band pass* dari 2 Hz hingga 8 Hz, waktu mulai pada pukul 06.34.30 UTC dan waktu akhir sinyal 06.38.00 UTC. Hasil pengolahan dari kedua parameter yang berbeda tersebut dilakukan analisis untuk melihat konsistensi hasil yang diperoleh.

### HASIL DAN PEMBAHASAN

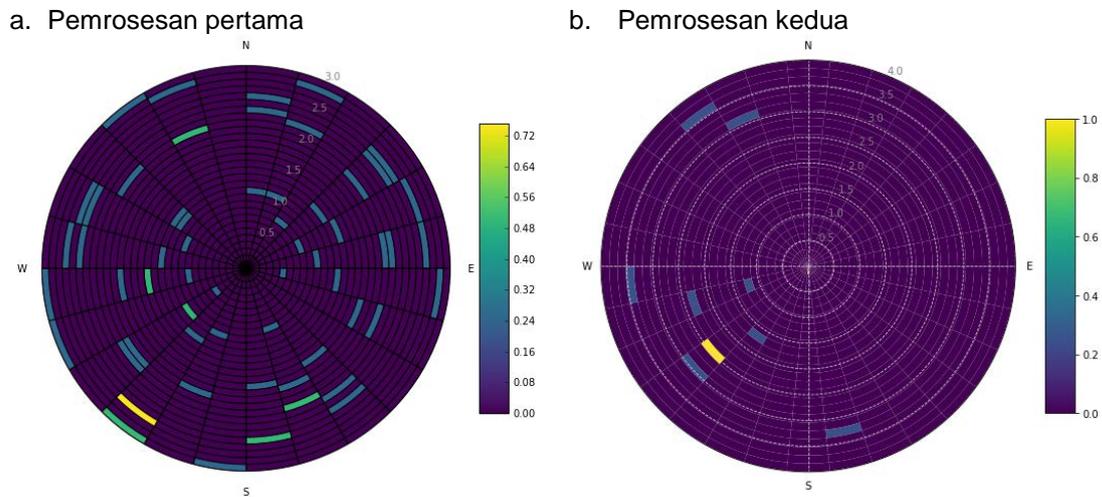
Pengolahan data gempa tanggal 23 Januari 2018 dilakukan dengan dua parameter input yang berbeda untuk melihat konsistensi arah *back azimuth*. Penapisan dilakukan pertama kali untuk menghasilkan data yang digunakan untuk pemrosesan. Kedua pengolahan menggunakan tapis *band pass* dengan besar maksimum tapis yang berbeda. Pengolahan pertama menggunakan penapisan minimal 1 Hz dan maksimal 7 Hz, sedangkan pada pengolahan kedua minimal 2 Hz maksimal 8 Hz. Hasil penapisan yang dilakukan ditunjukkan pada gambar 3. Terlihat bahwa waktu kedatangan gempa di setiap stasiun terlihat lebih jelas.



Gambar 3. Data rekaman yang telah mengalami penapisan sehingga sinyal gempa semakin jelas.

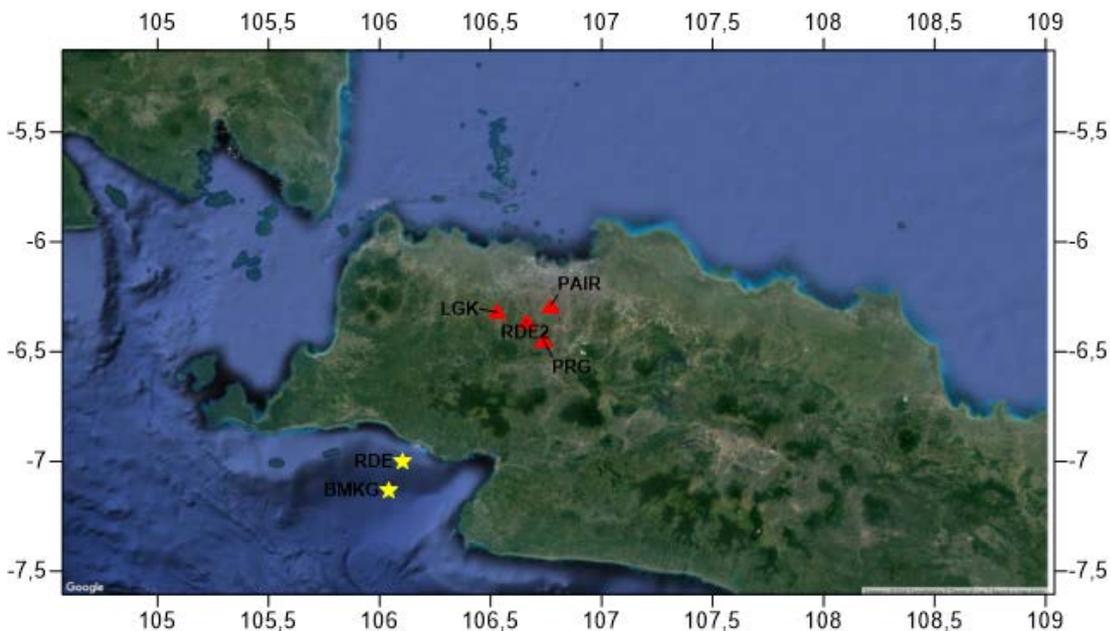
Data yang telah ditapis menunjukkan sinyal gempa yang lebih jelas sehingga mempermudah dalam melakukan analisis. Pemrosesan menggunakan masing-masing tapisan ditunjukkan dengan diagram fk (Gambar 4). Diagram tersebut menunjukkan keberadaan sebaran besar energi dalam tingkatan warna. Warna kuning menunjukkan energi yang paling besar. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa terdapat variasi warna di kedua hasil yang diperoleh. Variasi warna pada diagram fk dan adanya perbedaan nilai pada *slowness* dapat disebabkan oleh jarak gempa yang tidak terlalu jauh dari pusat *array* seismometer RDE. Hal ini menyebabkan asumsi *plane wave* kurang terpenuhi. Selain itu, *array* yang digunakan hanya berjumlah 4 stasiun sehingga masih adanya noise yang berjumlah koheren menghasilkan variasi warna di beberapa arah meskipun energinya tidak sebesar energi dari sinyal gempa yang diproses. Sinyal non gempa tersebut berjumlah koheren di 4 stasiun sehingga SNR yang dihasilkan cukup rendah. Semakin banyak jumlah stasiun seismometer dalam array semakin banyak noise yang dapat diidentifikasi sehingga hasil yang diperoleh lebih baik.

Pada pemrosesan pertama variasi warna lebih banyak dibandingkan pemrosesan kedua. Hal ini dapat terjadi karena input parameter yang digunakan pada pemrosesan kedua mempunyai SNR yang lebih tinggi dibanding input parameter pemrosesan pertama. Nilai *back azimuth* pada pemrosesan pertama berada pada sudut antara  $210^{\circ} - 225^{\circ}$  dengan besar *slowness* berkisar 2,6 s/deg hingga 2,7 s/deg. Nilai *back azimuth* pada pemrosesan kedua sebesar  $222^{\circ} - 234^{\circ}$  dengan nilai *slowness* berkisar 2,4 s/deg hingga 2,56 s/deg.



Gambar 4. Diagram fk hasil analisis fk beamforming pada event 23 Januari 2018

Kedua diagram fk menunjukkan nilai *back azimuth* dan *slowness* yang hampir sama. Arah *back azimuth* kedua diagram menunjukkan bahwa posisi gempa yang berada di sebelah Barat Daya stasiun seismik RDE. Hasil yang diperoleh dikorelasikan dengan hasil penentuan lokasi gempa yang dilakukan oleh BMKG [10] dan Pemantauan Kegempaan RDE bulan Januari oleh BATAN. BMKG menunjukkan pada tanggal 23 Januari 2018 pukul 06.34.54 UTC terjadi gempa dengan koordinat 7,13 LS dan 106,04 BT dan penentuan lokasi gempa oleh BATAN pada bulan Januari menunjukkan adanya gempa pada tanggal 23 Januari 2018 pukul 06.34.56 UTC dengan koordinat 7 LS dan 106,1 BT. Hasil penentuan lokasi gempa BMKG dan BATAN di plot dalam peta untuk menunjukkan perbandingan hasil yang diperoleh (gambar 5).



Gambar 5. Plot lokasi episenter gempa hasil analisis BMKG dan BATAN

Jumlah stasiun *array* RDE dapat digunakan untuk mengetahui arah *back azimuth* sumber gempa. Meskipun ada perbedaan dalam parameter input yang digunakan pada kedua pemrosesan, hasil yang diperoleh hampir sama. Selain itu arah yang diperoleh sesuai dengan hasil penentuan lokasi gempa BMKG dan BATAN. Hasil penentuan lokasi gempa BMKG dan BATAN menunjukkan bahwa episenter gempa BMKG dan BATAN berada di sekitar range *back azimuth* hasil dari kedua pemrosesan analisis fk beamforming.

## KESIMPULAN

Analisis fk beamforming pada dua pemrosesan dengan menggunakan parameter input yang berbeda yaitu rentang tapisan, jumlah fraksi, *windowing*, waktu mulai, dan waktu akhir masing-masing menghasilkan nilai *back azimuth* dan *slowness* yang hampir sama. Variasi warna yang menunjukkan persebaran energi pada pemrosesan kedua lebih sedikit dibandingkan pemrosesan pertama. Hal ini dikarenakan SNR yang dihasilkan pada pemrosesan kedua lebih besar dikarenakan pemilihan input parameter yang lebih baik. Penggunaan input parameter yang tepat dapat meningkatkan SNR. Perbedaan nilai *slowness* disebabkan oleh asumsi *plane wave* kurang terpenuhi dan jumlah stasiun hanya 4 buah sehingga tidak semua noise terjumlah inkoheren. Meskipun menggunakan input parameter yang berbeda arah *back azimuth* kedua pemrosesan hampir sama dan sesuai dengan hasil penentuan lokasi gempa yang dilakukan oleh BMKG dan BATAN. Jadi dari analisis fk beamforming, stasiun RDE dapat digunakan untuk penentuan *back azimuth* gempa dengan syarat asumsi *plane wave* terpenuhi untuk mendapatkan nilai *back azimuth* dan *slowness* yang tepat.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Kepala Pusat Kajian Sistem Energi Nuklir dan Kepala Bidang Kajian Data Tapak yang telah mendukung kegiatan penelitian.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] "PERATURAN KEPALA BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR NOMOR 8 TAHUN 2013 TENTANG EVALUASI TAPAK INSTALASI NUKLIR UNTUK ASPEK KEGEMPAAN," Jakarta, 2013.
- [2] I. Meilano, H. Andreas, H. Z. Abidin dan D. Sarsito, "Slip Rate Estimation of the Lembang fault West Java from Geodetic Observation," *Journal of Disaster Research*, vol. 7, no. 1, pp. 12-18, 2012.
- [3] H. Suntoko dan Supartoyo, "Konfirmasi Patahan Permukaan Awal Berdasarkan Data Geologi dan Data Gempa Daerah Kawasan Puspipetek Serpong," *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, vol. 18, no. 1, pp. 1-10, 2016.
- [4] H. Suntoko dan Sriyana, "Identifikasi Patahan Menggunakan Analisis Data Deformasi Tanah di Tapak RDE Serpong," *Eksplorium*, vol. 38, no. 2, pp. 99-108, 2017.
- [5] S. Rost dan C. Thomas, "ARRAY SEISMOLOGY: METHODS AND APPLICATIONS," *Reviews of Geophysics*, vol. 40, no. 3, pp. 2-1 - 2-27, 2012.
- [6] M. J. Hinich, "Frequency-wavenumber array processing," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 69, no. 3, pp. 732-737, 1981.
- [7] M. Gal, "Seismic array analysis of ocean induced microseism," PhD Thesis University of Tasmania, 2016.
- [8] N. N. Ismail, S. H. Joh dan R. H. M. R. Ahmad, "Beamforming Technique for Investigation of Lateral Variability at Geotechnical Sites," *Sains Malaysiana*, vol. 41, no. 12, pp. 1621-1627, 2012.
- [9] O. D. Team, "ObsPy," [Online]. Available: [https://docs.obspy.org/tutorial/code\\_snippets/beamforming\\_fk\\_analysis.html](https://docs.obspy.org/tutorial/code_snippets/beamforming_fk_analysis.html). [Diakses 11 Oktober 2018].
- [10] BMKG, "Indonesia Tsunami Early Warning System," Badan Meteorologi dan Klimatologi Geofisika, [Online]. Available: <https://inatews.bmkg.go.id/new/>. [Diakses 19 Oktober 2018].

## DISKUSI/TANYA JAWAB

### 1. PERTANYAAN :

Dengan analisis ini seberapa besar peningkatan keakuratan penentuan lokasi gempa?

### JAWABAN :

Peningkatan akurasi besar tetapi tidak dapat diketahui nilai pasti. Untuk besaran kuantitas besarnya tergantung pada besar dan konfigurasi array, input parameter, serta jarak gempa dengan array stasiun. Besarnya akurasi dikarenakan analisis ini meningkatkan Signal to Noise Ratio (SNR) sehingga data yang digunakan sebagai pengolahan berisi sinyal gempa dengan minim noise. Tingkat keakurasian besar asalkan kriteria dan syarat terpenuhi yaitu gelombang gempa berupa *plane wave* dan input parameter yang digunakan benar.

### 2. PERTANYAAN :

Bagaimana cara mengetahui suatu gempa merupakan *plane wave*?

### JAWABAN :

Asumsi *plane wave* didapatkan jika sumber gempa relatif jauh dari jarak antar stasiun dalam *array*.

## **IDENTIFIKASI SEBARAN POTENSI DAERAH INTERES PLTN MENGUNAKAN ANALISIS RASTER DI PROVINSI NUSA TENGGARA BARAT**

**Euis Etty A<sup>1</sup>, Abimanyu Bondan W.S<sup>2</sup>, Hadi Suntoko<sup>3</sup>**

*<sup>123</sup> Pusat Kajian Sistem Energi Nuklir-BATAN, Jl.Kuningan Barat-Mampang Prapatan, Jakarta, 12710  
email: euisetty@batan.go.id*

### **ABSTRAK**

**IDENTIFIKASI SEBARAN POTENSI DAERAH INTERES PLTN MENGGUNAKAN ANALISIS RASTER DI PROVINSI NUSA TENGGARA BARAT.** Kebutuhan listrik di Indonesia semakin meningkat terutama di daerah Indonesia bagian tengah dan timur. Maka dari itu sangat diperlukan daerah sebagai calon tapak pembangkit listrik khususnya Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) yang aman dari kejadian eksternal di daerah tersebut. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi sebaran daerah yang berpotensi sebagai tapak interes PLTN di wilayah provinsi Nusa Tenggara Barat (NTB). Metode yang digunakan perhitungan raster menggunakan (software) ArcGIS dari data spasial kejadian eksternal yang dapat mempengaruhi keselamatan tapak. Input berupa data spasial dari struktur geologi, litologi, gunung api, tsunami, kondisi air tanah dan penggunaan lahan. Hasil analisis raster menunjukkan bahwa Pulau Lombok dan Sumbawa sebagian besar berpotensi sangat rendah untuk dijadikan tapak interes PLTN. Namun beberapa daerah di kabupaten Bima, Pulau Ngali, Pulau Rakit, dan pesisir Lape mempunyai nilai yang cukup tinggi, sehingga dapat dijadikan kandidat tapak interes PLTN.

Kata kunci: tapak interes, PLTN, analisis raster, NTB

### **ABSTRACT**

**IDENTIFICATION OF THE INTERES AREAS FOR NUCLEAR POWER REACTOR (NPP) SITES USING RASTER ANALYSIS IN WEST NUSA TENGGARA PROVINCE .** Electricity needs in Indonesia especially in central and eastern Indonesia are increasing. Accordingly it is necessary to identify a number of regions as potential sites for power plants, including the Nuclear Power Plant (NPP) which are safe from external events. The purpose of this study is to identify the potential areas to be an interrelated sites for the nuclear power plants in the province of West Nusa Tenggara (NTB). The method is raster analysis using ArcGIS software from spatial data on external events that can affect site safety. Input are spatial data from geological structure, lithology, volcanic activity, tsunami, groundwater conditions and land use. The results show that the Lombok and Sumbawa island have very low potential to be the potential sites for nuclear power plants. However, some regions in Bima, Ngali Island, Rakit Island and Lape coastal areas have relatively high scores, so they can be used as candidates for the nuclear power plant sites.

Keyword: site interest, NPP, raster analysis, NTB

### **PENDAHULUAN**

Kebutuhan energi listrik di Indonesia semakin bertambah setiap tahunnya. Hal ini seiring dengan jumlah permintaan yang semakin meningkat terutama di daerah Indonesia bagian tengah dan timur yang mulai melakukan pengembangan wilayah industri dan pariwisata. Program pemerintah ini sangat mempengaruhi kebutuhan listrik sehingga diperlukan sumber energi baru yang dapat menghasilkan energi listrik berkapasitas besar, stabil, sesuai dengan kondisi geografis serta jaringan transmisi yang ada. Salah satu sumber energi yang dapat dikembangkan di Indonesia bagian tengah adalah Nuklir. Terkait dengan kapabilitas jaringan transmisi listrik yang terbatas, kondisi geografis serta biaya total pembangunan instalasi kecil, Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) berskala kecil dan menengah cocok dibangun di Indonesia bagian tengah dan timur [1].

Salah satu aspek penting untuk persiapan pembangunan PLTN adalah tersedianya tapak yang aman dari kejadian eksternal yang mungkin berlangsung di dalam area tapak yang dapat mempengaruhi keselamatan PLTN [2]. Di Indonesia penyiapan tapak PLTN telah dilakukan sejak tahun 1994 dimulai dari tapak Semenanjung Muria di Jawa Tengah,

kemudian penyiapan tapak di Banten, Kalimantan Barat, Kalimantan Timur, Batam dan Pulau Bangka. Selanjutnya pada tahun 2017, BATAN mulai melakukan kegiatan pra survei tapak PLTN di Provinsi Nusa Tenggara Barat.

Tahap pra survei merupakan tahap awal penentuan tapak terpilih di lokasi yang siap untuk dibangun PLTN. Dalam tahap pra survei, lokasi tapak ditentukan secara regional berdasarkan kriteria umum untuk mendapatkan daerah yang berpotensi sebagai tapak interes. Daerah-daerah tersebut selanjutnya dilakukan studi evaluasi lebih rinci. Sebelum melakukan konfirmasi di lapangan, penentuan lokasi atau daerah untuk penyiapan tapak PLTN ini dapat dilakukan dengan menggunakan Sistem Informasi Geografi (SIG).

Sistem Informasi Geografi (SIG) merupakan suatu alat yang dapat digunakan untuk mengumpulkan, mengolah dan menampilkan data spasial agar lebih informatif secara keruangan. SIG mampu menganalisis masalah spasial maupun non spasial beserta kombinasinya (*queries*) dalam rangka memberikan solusi atas permasalahan keruangan [3]. Analisis spasial merupakan salah satu bagian dari kajian sistem informasi geografis dengan mempertimbangkan berbagai aspek yang bertujuan untuk menentukan zonasi lahan yang sesuai dengan karakteristik yang ada [4]. Dalam konteks pembangunan, sistem informasi geografi dapat membantu dalam proses pengambilan keputusan termasuk didalamnya adalah pembuatan kebijakan, perencanaan maupun pengelolaan salah satunya adalah kebijakan dalam penentuan lokasi tapak PLTN.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui sebaran potensi daerah-daerah interes PLTN di Provinsi Nusa Tenggara Barat. Dari hasil penelitian ini diharapkan dapat membantu kegiatan studi lanjut untuk pemilihan lokasi tapak terpilih yang layak dibangun PLTN.

## METODOLOGI

### Alat dan Bahan

Penelitian ini menggunakan komponen data geologi antara lain struktur geologi dan sebaran litologi, aktifitas gunungapi, bencana geologi berupa tsunami, geohidrologi yaitu potensi airtanah dan penggunaan lahan. Data diambil dari badan ESDM Provinsi Nusa Tenggara Barat berupa format *shapefile* yang diolah menggunakan perangkat lunak ArcGIS 10.2.2.

### Daerah Penelitian

Lokasi penelitian fokus pada Provinsi Nusa Tenggara Barat dibatasi dengan titik koordinat  $115^{\circ} 46' - 119^{\circ} 5'$  BT dan  $8^{\circ} 10' - 9^{\circ} 5'$  LS, disajikan pada Gambar 1. Secara geografis, bagian utara Provinsi Nusa Tenggara Barat berbatasan dengan Laut Jawa dan Laut Flores, bagian selatan dibatasi oleh Samudera Hindia. Bagian Barat berbatasan dengan Provinsi Bali sedangkan bagian timur berbatasan dengan Provinsi Nusa Tenggara Timur [5].



Gambar 1. Lokasi Penelitian.

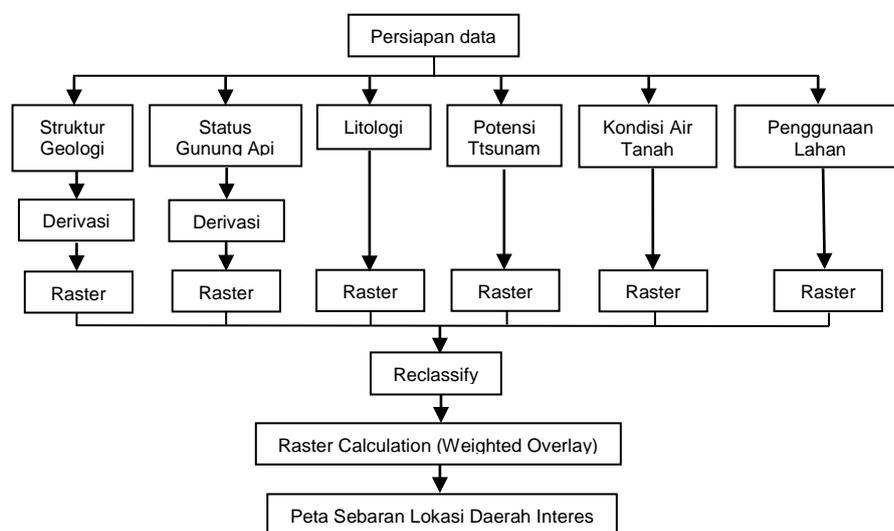
Provinsi Nusa Tenggara Barat memiliki dua pulau besar yaitu Pulau Lombok dan Pulau Sumbawa. Variasi topografi kedua pulau tersebut adalah dataran tinggi, pegunungan, dataran rendah, pesisir yang cenderung kering dengan temperatur maksimum pada tahun

2016 bekisar antara 32,3°C-33,5°C [5]. Secara garis besar penggunaan lahan di Provinsi Nusa Tenggara Barat berupa sabana, hutan kering, sawah kering dan permukiman.

### Analisis Spasial

Penelitian ini menggunakan metode analisis raster untuk mengidentifikasi daerah yang berpotensi sebagai daerah-daerah interes PLTN di Provinsi Nusa Tenggara Barat. Langkah awal tahapan penelitian ini adalah mempersiapkan dan mengumpulkan data yang akan digunakan sebagai parameter penting faktor eksternal dalam keselamatan operasional PLTN. Data-data tersebut antara lain struktur geologi, litologi batuan, sebaran dan klasifikasi gunung api, sebaran dampak tsunami, kondisi air tanah dan penggunaan lahan. Data-data tersebut berupa *feature* berekstensi *shapfile* yang nantinya akan diolah dan dianalisis dalam *software* ArcGIS.

Tahap selanjutnya adalah masuk dalam tahap pengolahan data. Dalam tahapan ini, proses yang akan dijalankan adalah merubah bentuk data menjadi raster. Ada beberapa data yang diperlukan proses derivasi antara lain data gunungapi dan struktur geologi. Proses ini merupakan tahap untuk membuat model kesesuaian agar data-data tersebut memiliki nilai pada setiap sel-nya.



Gambar 2. Tahapan Penelitian

Setelah semua data terolah ke dalam bentuk raster, tahapan selanjutnya adalah analisis data. *Reclassify* merupakan bagian dari analisis data yang di dalamnya adalah proses mengklasifikasi ulang setiap raster kedalam besaran interval yang telah ditentukan dengan mengganti nilai sel input menjadi nilai sel output yang baru [16]. Dalam penelitian ini setiap raster dinilai besarnya menjadi 10 klasifikasi. Langkah terakhir adalah memberikan nilai bobot dan mengkombinasikan pada setiap layer menggunakan teknik *weighted overlay* pada ekstensi *spatial analyst*. Pada tahap ini semua bobot yang diberikan pada setiap parameter disesuaikan terhadap dampak yang akan diberikan terhadap keselamatan di setiap daerah (Tabel 1). Semakin besar hasil bobot yang diperoleh maka semakin besar dampak yang akan diberikan begitu juga sebaliknya

Tabel 1. Tabel Bobot Penilaian .

No	Parameter	Bobot
1	Struktur Geologi	30
2	Geologi	20
3	Gunung Api	15
4	Tsunami	10
5	Akuifer	10
6	Tata-guna Lahan	15
Total		100

Struktur geologi adalah parameter dengan nilai bobot terbesar. Hal ini dikarenakan struktur geologi adalah faktor pembatas utama pada pemilihan lokasi daerah-daerah interes PLTN. Menurut Peraturan Kepala Bapeten nomor 8 tahun 2013 disebutkan bahwa pada radius 5 km dari tapak instalasi nuklir tidak boleh ada patahan kapabel [17]. Dalam penelitian ini aktif atau tidak aktifnya struktur geologi tidak digunakan sebagai faktor pembatas dalam pemberian penilaian, tetapi berdasarkan jarak terhadap struktur geologi tersebut. Sedangkan litologi digunakan berdasarkan material geologi yang sesuai untuk pondasi PLTN yaitu masif yang telah berumur tua yaitu tersier.

Terdapat tiga gunung api dengan status aktif yaitu G. Sangeang, G. Tambora dan G. Rinjani. Selain status, sebagai faktor pembatas jarak gunungapi juga digunakan untuk memberikan nilai. Geohidrologi dinilai berdasarkan kondisi potensi airtanah yang ada di provinsi tersebut. Apabila produktifitas airtanah besar maka memiliki nilai bobot besar. Sedangkan bencana geologi berupa tsunami, Provinsi Nusa Tenggara Barat memiliki potensi di bagian selatan maupun utara pesisir pulau Sumbawa maupun Lombok. Sehingga parameter ini dipakai untuk analisis berdasarkan sebaran dampak tsunami.

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan dapat diketahui sebaran potensi daerah-daerah interes PLTN di Provinsi Nusa Tenggara Barat dengan zonasi 3 km dari garis pantai seperti yang disajikan pada Gambar 2. Pada gambar tersebut diketahui nilai hasil perhitungan raster dengan simbol warna merah memiliki nilai 0 sedangkan warna biru tua memiliki nilai terbesar yaitu 10. Warna biru tua adalah lokasi yang berkarakteristik lahan paling sesuai, karena diluar dari zona pembatas utama yaitu struktur geologi, di luar daerah yang memiliki dampak tsunami. Sehingga lokasi ini dianggap paling berpotensi sebagai daerah-daerah interes PLTN. Sedangkan daerah yang berwarna merah adalah lokasi yang tidak sesuai dan dianggap tidak berpotensi sebagai daerah-daerah interes PLTN. Hal ini disebabkan daerah-daerah tersebut masuk ke dalam zona pembatas utama.

Hampir sebagian wilayah pesisir selatan dan utara Provinsi Nusa Tenggara Barat berwarna merah. Diketahui bahwa, struktur geologi kepulauan Nusa Tenggara Barat dikontrol oleh subduksi bagian selatan dan patahan busur belakang Flores di bagian utara [astawa]. Proses tektonik aktif dari arah utara dan selatan berpengaruh pada kegempaan di wilayah Nusa Tenggara Barat, kegempaan aktif terjadi hampir di seluruh pesisir selatan dan sebagian utara [7,8,9,10,11,12].



Gambar 2. Sebaran Potensi daerah Interes PLTN di Provinsi Nusa Tenggara Barat hasil analisis raster.

Berdasarkan Gambar 2, Pulau Lombok teridentifikasi sebagian besar wilayahnya memiliki potensi sangat rendah untuk dijadikan sebagai daerah-daerah interes PLTN. Selain struktur geologi sebagai penyumbang utama, litologi batuan di pulau ini diketahui sebagai faktor kedua dalam ketidaksesuaian sebagai potensi daerah interes PLTN. Berdasarkan data geologi yang digunakan diketahui daerah pesisir di Pulau Lombok sebagian besar berupa endapan permukaan, material gunungapi muda dan dibagian selatan terdapat sedikit

material metasedimen. Berdasarkan Peta Geologi Lembar Lombok [13] endapan permukaan adalah material alluvium yang tersusun oleh kerakal, kerikil, pasir, lempung, gambut dan pecahan koral. Sedangkan batuan gunungapi muda ini tersusun oleh lava, breksi dan tuf Gunung Pusuk, Nangi dan Rinjani yang menunjukkan struktur skorria, kadang-kadang dijumpai pada tebing tebing terjal menunjukkan struktur kekar. Breksi berwarna abu-abu kehitaman, menyudut, fragmen andesit, keras dan kompak. Tufa berwarna putih kekuningan, mudah hancur, berukuran pasir halus hingga sangat kasar dan dijumpai fragmen batu apung. Sedangkan material metasedimen tersusun atas tuf berbatuapung, perselingan breksi gampingan dan lava.

Sedangkan daerah di bagian utara Pulau Lombok tersebar warna biru yang teridentifikasi di kecamatan Gangga hingga Bayan. Berdasarkan dari analisis nilai pembobotan yang telah dilakukan diketahui faktor produktifitas airtanah dan penggunaan lahan sangat mempengaruhi nilai tersebut.

Sebaran lokasi dengan potensi tapak interes dengan nilai maksimum tidak ditemukan di pulau Sumbawa. Sedangkan nilai 8 yang disajikan dengan warna biru muda cerah, banyak teridentifikasi tersebar di pesisir selatan yaitu kecamatan Jereweh hingga Hu'u. Parameter yang mendukung adalah daerah tersebut berada di luar zona struktur geologi, aman dari potensi tsunami, penggunaan lahan yang masih berupa lahan belukar, rumput maupun hutan. Meskipun demikian material geologi, keberadaan gunung api dan potensi airtanah yang rendah masih memiliki parameter pembatas. Sedangkan pesisir bagian utara terdapat sebaran lokasi dengan nilai 9 yang disajikan dengan warna biru muda di pesisir Wera hingga Palibelo yaitu di wilayah Kabupaten Bima dan pesisir Lape, P. Ngali dan P. Rakit di Kabupaten Sumbawa. Nilai 8-9 yang dihasilkan merupakan lokasi yang memiliki potensi mendekati sangat baik sebagai daerah interes PLTN.

Apabila diasosiasikan dengan keadaan geografis di provinsi Nusa Tenggara Barat, lokasi yang berpotensi sebagai daerah interes PLTN yang tersebar di sekitar Teluk Saleh adalah lokasi paling baik. Mengingat lokasi tersebut berbatasan langsung dengan perairan Teluk Saleh yang tenang dan terdapat Pulau Moyo di bagian utara sebagai barrier. Sehingga potensi dampak yang diakibatkan oleh faktor eksternal seperti bahaya tsunami di lokasi tersebut boleh jadi rendah sehingga dapat memberikan nilai raster yang tinggi sebagai daerah potensi interes PLTN.

Hasil penelitian ini masih memiliki keterbatasan terutama data yang digunakan adalah data yang belum terkompilasi dengan kejadian bencana gempabumi yang telah terjadi di bulan September 2018. Meskipun demikian, dari hasil analisis ini sudah dapat digunakan sebagai acuan awal dalam penentuan lokasi tapak terpilih untuk pembangunan PLTN di NTB

## **KESIMPULAN**

Berdasarkan hasil analisis raster yang ditinjau dari kondisi geologi (struktur geologi dan material), gunungapi, bencana geologi yaitu tsunami, potensi air tanah dan tata-guna lahan diketahui bahwa sebagian besar pesisir di Provinsi Nusa Tenggara Barat memiliki potensi daerah interes PLTN yang rendah. Meskipun demikian, di Provinsi Nusa Tenggara Barat juga teridentifikasi sebagian daerah lainnya dengan nilai 8-9 yang dapat diartikan cukup baik untuk tapak interes PLTN. Daerah ini tersebar di pesisir selatan Sumbawa Barat. Pesisir utara Pulau Sumbawa sebagian besar tersebar di pesisir Bima dan Sumbawa. Sedangkan di Pulau Lombok, daerah yang berpotensi sebagian di pesisir utara Lombok Utara dan Lombok Selatan.

## **UCAPAN TERIMA KASIH**

Terima kasih penulis sampaikan pada Kepala Pusat PKSEN Dr. Suparman dan Kepala Bidang Kajian Data Tapak Dr. Sunarko. yang telah memberikan arahan dan masukan dalam penulisan. Kepada Dinas ESDM Provinsi Nusa Tenggara Barat terimakasih atas bantuan dan dukungannya dalam kegiatan pengumpulan data-data yang dibutuhkan.

## **DAFTAR PUSTAKA**

- [1] PKSEN-BATAN, "Indonesia Nuclear Energy Outlook 2016: Produksi Limbah PLTN dan Pengelolaannya", BATAN, Jakarta (2016).

- [2] IAEA, "Safety Standard Series No. NS-R-3 (Rev.1): Site Evaluation for Nuclear Installation, Vienna (2016).
- [3] Prahasta E. "Sistem Informasi Geografis: Konsep – Konsep Dasar (Perspektif Geodesi & Geomatika)", Informatika, Bandung (2014).
- [4] Hanif Anasiru R, "Analisis Spasial Dalam Klasifikasi Lahan Kritis Di Kawasan Sub-DAS Langge Gorontalo", Jurnal Informatika Pertanian, Volume 25 No.26 Hal. 261-272, Jakarta, (2016).
- [5] BPS, "Provinsi Nusa Tenggara Barat Dalam Angka 2017", BPS, (2017).
- [6] I.N. Astawa, dkk, "Seismik Stratigrafi Perairan Lombok Lembar Peta 1807, Nusa Tenggara Barat", Jurnal Geologi Kelautan Volume 3 No 3, pp. 8-14, Bandung, (2005).
- [7] B. Sunardi, "Analisa Fraktal Dan Rasio Slip Daerah Bali-Ntb Berdasarkan Pemetaan Variasi Parameter Tektonik", Jurnal Meteorologi Dan Geofisika Volume 10 No 1 pp. 58 – 65, (2009).
- [8] Bunaga, S, dkk, "Relokasi Parameter Hiposenter Di Wilayah Nusa Tenggara Barat (Ntb) Dan Sekitarnya Dengan Menggunakan Metode Double Difference", Spektra: Jurnal Fisika dan Aplikasinya, Vol. 16, No. 2, pp. 6-9, (2015).
- [9] B. Sunardi, dkk, "Analisis Seismotektonik dan Periode Ulang Gempabumi Wilayah Nusa Tenggara Barat, Tahun 1973-2015", Jurnal Riset Geofisika Indonesia Vol.1 No. 1 , pp. 23-28, (2017).
- [10] N. Nguyen, et.al, "Indonesia's Historical Earthquakes (Modelled Examples For Improving The National Hazard Map)", Geoscience Australia, Australian Government, (2015).
- [11] Kurniawan, R, "Pemetaan Ground Acceleration Menggunakan Metode Probabilistic Seismic Hazard Analysis Di Propinsi Nusa Tenggara Baratpada Zona Megathrust", (Senatik) Seminar Nasional Teknologi Informasi Dan Kedirgantaraan Vol. 3, Pp. 132-137, (2017).
- [12] Prakosa, TA, Rohadi, S, "Relokasi Gempa Bumi Teleseismic Double-Difference di Wilayah Bali - Nusa Tenggara dengan Model Kecepatan 3D", Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi, Vol. 9 No. 1, pp. 45 – 52, (2018).
- [13] Andi Mangga S., drr, "Geologi Lembar Lombok, Nusatenggara" Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, (1994).
- [14] A Sudrajat., drr, "Geologi Lembar Sumbawa, Nusatenggara" Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, (1998).
- [15] D.Z.Herman, dkk, "Kajian Potensi Tambang Dalam Pada Kawasan Hutan Lindung Daerah Taliwang, Kabupaten Sumbawa Barat Nusa Tenggara Barat", Proceeding Pemaparan Hasil Kegiatan Lapangan Dan Non Lapangan, Pusat Sumber Daya Geologi, Bandung, (2007).
- [16] ESRI, "Using ArcGIS: Spatial Analyst", ESRI, USA, (2002).
- [17] Peraturan Kepala BAPETEN, "Evaluasi Tapak Instalasi Nuklir Untuk Aspek Kegempaan", Perka BAPETEN no.8 tahun 2013, BAPETEN (2013).

## KAJIAN POTENSI BAHAYA EKSTERNAL ALAMIAH DALAM PENETAPAN TAPAK PLTN DI INDONESIA: STUDI KASUS TAPAK BANGKA

Siti Alimah<sup>1</sup>, Hadi Suntoko<sup>1</sup>, Kurnia Anzhar<sup>1</sup>, June Mellawat<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Pusat Kajian Sistem Energi Nuklir-BATAN

<sup>2</sup>Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi-BATAN

Jl. Kuningan Barat, Mampang Prapatan Jakarta 12710,

E-mail: [alimahs@batan.go.id](mailto:alimahs@batan.go.id)

### ABSTRAK

**KAJIAN POTENSI BAHAYA EKSTERNAL ALAMIAH DALAM PENETAPAN TAPAK PLTN DI INDONESIA: STUDI KASUS TAPAK BANGKA.** Berdasarkan acuan atau *safety guide* keselamatan IAEA dan Peraturan Bapeten telah dilakukan kajian potensi bahaya eksternal alamiah pada penetapan tapak PLTN di Indonesia. Kajian ini meliputi aspek kegempaan dan sesar permukaan, meteorologi ekstrim/jarang terjadi, banjir (sungai dan tsunami), geoteknik, dan kegunungpian yang wajib dilakukan dalam penetapan tapak PLTN. Karakteristik tapak dan kondisi lingkungan terkait dengan potensi bahaya eksternal alamiah tersebut dapat mempengaruhi keselamatan instalasi PLTN. Tujuan penelitian adalah mengidentifikasi potensi bahaya eksternal alamiah yang dapat membahayakan tapak PLTN dan penerapannya pada studi kasus tapak Bangka yaitu Teluk Menggris Kabupaten Bangka Barat dan Tanjung Berani Kabupaten Bangka Selatan. Metode yang digunakan meliputi studi pustaka terkait aspek bahaya eksternal alamiah, identifikasi berbagai jenis bahaya eksternal alamiah di tapak Bangka Barat dan Selatan dan analisis dengan mengadopsi kriteria keselamatan sebagai persyaratan untuk keamanan tapak PLTN. Hasil kajian menunjukkan bahwa tapak Bangka Barat dan Bangka Selatan aman dari potensi bahaya eksternal alamiah. Pada tapak tersebut tidak teridentifikasi adanya sesar kapabel dan nilai PGA kurang dari 0,6 g. Lapisan batuan di dominasi oleh batu pasir dan batu lempung dari formasi Tanjung Genting, serta nilai daya dukung di area tapak memenuhi syarat untuk konstruksi PLTN. Di tapak juga tidak ditemukan potensi bahaya gunung api. Potensi meteorologi ekstrim/jarang terjadi/jarang terjadi di kedua tapak tersebut berupa petir, angin kuat akibat siklon tropis yang memicu hujan deras dan puting beliung berskala fujita 0-1, dapat menggunakan margin keselamatan berskala fujita 2. Luapan banjir sungai di ke dua tapak mempunyai ketinggian 5 m dpl, dapat menggunakan margin keselamatan elevasi bangunan PLTN sekitar 7 m dpl.

Kata kunci: karakteristik tapak, kondisi lingkungan, PLTN, bahaya eksternal alamiah, kriteria keselamatan.

### ABSTRACT

**STUDY OF THE POTENTIAL OF NATURAL EXTERNAL HAZARD ON NUCLEAR PLANT DETERMINATION IN INDONESIA: CASE STUDY OF BANGKA SITES.** Based on safety reference or safety guide of IAEA and Bapeten Regulation there has been a study of the potential of natural external hazard to the determination of nuclear power plant in Indonesia. This assessment covers aspects of earthquake and surface faults, extreme meteorology/rare, flooding (rivers and tsunamis), geotechnical, and volcanoes that must be done in the determination of NPP sites. Site characteristics and environmental conditions associated with the potential of natural external hazard may affect the safety of nuclear plants. The objective of the study was to identify potential potential of natural external hazard that could hazards of NPP sites and their application to the Bangka case study cases are Teluk Menggris West Bangka Regency and Tanjung Berani of South Bangka Regency. The methods used include literature study related to natural external hazard aspects, identification of various types of natural external hazards in The West and South Bangka sites and analysis by adopting the safety criteria as a requirement for the safety of NPP sites. The results show that the Bangka sites are safe from potential external natural hazards. There is no identifiable capale fault and PGA value less than 0.6 PGA. The rock layer is dominated by sandstone and clay stone from Tanjung Genting formation, bearing capacity in the site area is meet for the requirements for NPP construction. There is no potential volcanic hazard in the site. The extreme meteorological potentials/rare on both sites are lightning, strong winds due to tropical cyclones that trigger heavy rain and tornadoes with

fujita-scale 0-1, can use a fujita-scale safety margin 2. Floodwaters of river on both sites have height 5 m dpl, can use margin of safety elevation of NPP about 7 m dpl.

Keywords: site karakteristik, environmental conditions, NPP, natural external hazard, safety criteria

## PENDAHULUAN

Dalam Perpres No. 46 Tahun 2013 tentang Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) disebutkan bahwa salah satu tugas BATAN di Bidang Teknologi Energi Nuklir adalah melaksanakan perumusan dan kebijakan di Bidang Pengembangan Teknologi Energi Nuklir. Rencana pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) merupakan salah satu perumusan dan pelaksanaan kebijakan tersebut. Dalam rencana pembangunan PLTN, kegiatan pemilihan tapak merupakan salah satu langkah penting[1]. Tahapan dalam pemilihan tapak adalah tahap pra-survei, survei tapak dan evaluasi tapak. Tahapan evaluasi tapak meliputi tahap seleksi tapak, tahap kajian tapak, tahap pra operasional dan tahap operasional. Dari tahapan tersebut diharapkan diperoleh tapak yang aman, layak dan cocok sesuai aspek keselamatan dan non-keselamatan serta standar yang berlaku[1]. Dalam buku panduan keselamatan IAEA, aspek keselamatan menjadi pertimbangan utama penilaian kelayakan tapak PLTN[2]. Karakteristik tapak dan karakteristik lingkungan alam di daerah tapak dapat mempengaruhi keselamatan PLTN sehingga harus diteliti dan dikaji. Keselamatan dari personil instalasi, masyarakat dan lingkungan dari bahaya radiologi, juga menjadi pertimbangan penting dalam penetapan tapak PLTN [3]. Dalam pemilihan tapak, faktor eksternal alamiah yang perlu diteliti dan dikaji meliputi aspek kegempaan dan sesar permukaan, meteorologi ekstrim/jarang terjadi, banjir (aspek hidrologi dan oseanografi), geoteknik dan kegunungapian.

Aspek kegempaan meliputi kajian data katalog gempa, sejarah gempa, gempa merusak, gempa dangkal dan gempa dalam dan percepatan tanah yang terukur. Data geologi yang dimanfaatkan berdasar analisis struktur geologi yang menyebabkan gempa, sedangkan data geofisika berdasar informasi material bawah permukaan. Aspek kegunungapian merupakan aspek keselamatan tapak yang dianalisis berdasarkan kajian aktivitas gunung api saat ini di sekitar wilayah, berdasar produk yang dihasilkan yaitu lava, piroklastik, awan panas dan lahar. Potensi bahaya eksternal alamiah aspek kegunungapian dikaji dari jarak produk gunungapi ke salah satu wilayah. Aspek meteorologi yang dikaji, yaitu data meteorologi ekstrim/jarang terjadi dari angin, temperatur, hujan, petir dan kecepatan angin. Sedangkan fenomena banjir dikaji dari hidrologi dan oseanografi. Oseanografi merupakan aspek alamiah akibat gelombang pantai yang masuk ke daratan menyebabkan banjir pantai (tsunami). Hasil indentifikasi potensi bahaya eksternal alamiah, muaranya adalah untuk model desain pondasi, gedung dan instalasi lainnya.

Berdasar hasil evaluasi tapak di Pulau Bangka tahun 2013, telah ditentukan dua lokasi tapak yaitu di Kabupaten Bangka Barat (Teluk Menggris Kelurahan Tanjung, Kecamatan Muntok) dan di Kabupaten Bangka Selatan (Tanjung Berani Desa Sebagin, Kecamatan Simpang Rimba). Secara geografis, Kabupaten Bangka Barat terletak pada posisi 1° 00' - 2° 10' LS dan 105° 00' - 106° 00' BT, sedangkan Bangka Selatan terletak pada posisi 2° 26' 27" - 3° 5' 56" LS dan 107° 14' 31" - 105° 53' 09" BT[4,5]. Secara topografi rata-rata ketinggian wilayah calon tapak Bangka Barat adalah 32 m dpl dan Bangka Selatan 7 - 28 m dpl. Dalam mempersiapkan pemilihan tapak PLTN, lokasi yang dipilih adalah yang aman dari bahaya eksternal alamiah, sehingga kajian untuk mengetahui potensi bahaya eksternal alamiah di calon tapak diperlukan. Tujuan studi adalah mengidentifikasi potensi bahaya eksternal alamiah yang dapat mempengaruhi keselamatan tapak PLTN, penerapan pada tapak Kabupaten Bangka Barat (Teluk Menggris) dan Kabupaten Bangka Selatan (Tanjung Berani). Hasil studi diharapkan dapat menjadi masukan dalam pemilihan tapak PLTN di Indonesia, yang memenuhi persyaratan dan kriteria keselamatan tapak.

## SUMBER BAHAYA EKSTERNAL ALAMIAH DALAM PENETAPAN TAPAK PLTN

Tapak PLTN adalah lokasi yang layak untuk pembangunan reaktor nuklir beserta sistem terkait lainnya [6] dan telah dianalisis berdasarkan kriteria bahaya eksternal dan internal, dan umumnya berada di dekat pantai. Tapak yang layak adalah tapak yang memenuhi kriteria keselamatan dan standar yang berlaku. Posisi Indonesia terletak di jalur kegempaan dan gunungapi, sehingga Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN)

mewajibkan melakukan identifikasi dan karakterisasi calon tapak guna memperoleh tapak yang aman dan layak sesuai kaidah keselamatan reaktor nuklir[7].

Dalam pemilihan tapak PLTN diperlukan kajian terkait : (i) pengaruh kejadian eksternal di lokasi tapak dan wilayah sekitarnya baik yang berasal dari kejadian eksternal alamiah (bencana alam) maupun kejadian akibat kegiatan manusia, (ii) karakteristik tapak dan lingkungan yang berpengaruh terhadap reaktor nuklir dan perpindahan zat radioaktif yang dilepaskan reaktor nuklir sampai kepada manusia dan lingkungannya, (iii) kondisi demografi/kependudukan dan karakteristik lain dari tapak yang berkaitan dengan evaluasi risiko terhadap anggota masyarakat dan penerapan rencana penanggulangan kedaruratan. Aspek kajian yang diperlukan untuk evaluasi kejadian eksternal alamiah, meliputi : (i) gempa dan patahan permukaan, (ii) kondisi meteorologi (khususnya meteorologi ekstrem), (iii) banjir akibat curah hujan tinggi dan sebab lainnya (hidrologi dan oseanografi), (iv) bahaya geoteknik (seperti ketidakstabilan lereng, runtuh, ambles, atau terangkatnya permukaan tapak, likuifaksi tanah) dan (v) bahaya gunung api[2].

### **Gempa dan Patahan Permukaan**

Secara umum gempa adalah getaran yang disebabkan oleh proses pelepasan energi yang dapat disebabkan oleh aktivitas tektonik (patahan, penunjaman serta tumbukan lempeng litosfer di darat atau di laut), vulkanik maupun runtuh material yang besar. Kondisi kegempaan di suatu daerah dipengaruhi oleh tiga sumber gempa utama yaitu pertama gempa subduksi yang terjadi disebabkan oleh aktivitas lempeng, kedua gempa kerak yang terjadi disebabkan oleh aktivitas patahan dan ketiga gempa vulkanik yang terjadi disebabkan oleh aktivitas vulkanik[8].

Kondisi kegempaan di sekitar daerah tapak merupakan salah satu aspek yang harus dikaji dalam mendukung faktor keselamatan tapak PLTN. Informasi pra sejarah, sejarah dan rekaman data kegempaan di wilayah sekitar tapak dikumpulkan dan didokumentasi[9]. Data sejarah gempa yang perlu dikumpulkan meliputi : (i) Tanggal dan waktu gempa, (ii) Kontur isoseismal, (iii) Lokasi episenter makroseismik, (iv) Intensitas maksimum dan intensitas makroseismik episenter, (v) Penentuan magnitude, (vi) Perkiraan kedalaman focal (vii) Perkiraan ketidakpasian parameter di atas, (viii) Intensitas di tapak, disertai rincian efek tanah yang ada[10]. Untuk analisis keselamatan, diperlukan margin yang memadai di atas tingkat desain yang dievaluasi berdasar aspek kegempaan, sehingga tidak terjadi kehilangan fungsi keselamatan fundamental atau probabilitasnya cukup rendah.

Patahan permukaan atau sesar diartikan sebagai pergerakan tanah/batuan akibat adanya gaya yang bekerja pada salah satu titik sehingga menyebabkan retakan atau kerusakan[11]. Sesar permukaan terdiri dari sesar aktif, sesar tidak aktif (mati) dan sesar kapabel (*capable fault*). Sesar aktif terutama ditandai adanya gempa dangkal berskala besar ( $M > 5.5$ ) dan minimal sekali bergerak dalam kurun waktu tertentu[12]. Sesar kapabel adalah suatu patahan yang mempunyai potensi signifikan untuk terjadinya pergeseran pada atau dekat permukaan tanah dan menyebabkan patahan lain bergerak.

### **Meteorologi ekstrim/jarang terjadi**

Parameter meteorologi seperti kecepatan angin, intensitas curah hujan serta curah hujan total, badai, angin topan, suhu maksimum dan minimum, dari sisi keselamatan mempunyai peran penting dalam desain PLTN[13]. Curah hujan digunakan untuk perkiraan ketinggian air banjir maksimum, sedangkan kecepatan angin untuk mempelajari keamanan struktur terutama struktur instalasi tinggi seperti menara pendingin, menara transmisi dll. Untuk analisis keselamatan, nilai basis desain parameter meteorologi dievaluasi menggunakan analisis nilai ekstrim[3]. Untuk keselamatan fasilitas, maka struktur didesain tahan terhadap nilai ekstrim parameter yang terjadi selama umur fasilitas, untuk mempertahankan integritas dan fungsinya. Pengaruh kecepatan angin yang tinggi dapat menyebabkan material di tanah (misalnya tiang kayu, kendaraan dll.) terangkat ke udara dan dapat membentuk proyektil yang dapat berdampak pada struktur instalasi. Terkait dengan tornado dan siklon tropis, terdapat potensi bahaya rudal.

### **Banjir (Aspek Hidrologi Dan Oseanografi)**

Kajian terhadap bahaya banjir sungai (aspek hidrologi) dan banjir pantai/tsunami (aspek oseanografi) berpengaruh dalam keselamatan pengoperasian PLTN. Untuk keselamatan instalasi, tapak PLTN dilokasikan di atas *level* basis desain banjir (terdapat margin yang memadai di atas basis desain), sehingga dalam situasi ekstrem jika banjir

terjadi, mitigasi tersedia memadai. Penetapan basis desain banjir (*Design Basis Flood/DBF*) PLTN memerlukan identifikasi dari berbagai fenomena yang berkaitan dengan kondisi tapak yang dapat mengakibatkan banjir. Evaluasi terhadap banjir adalah akibat hujan dan semua sumber lain seperti tsunami, gempa (yang menyebabkan retaknya waduk dan danau), banjir sungai dan pantai, tersumbatnya sistem drainase (karena hujan deras) dan skenario potensi lainnya. Kajian DBF juga meliputi data sejarah terjadinya angin topan dan tornado di sekitar tapak, kecepatan angin, penurunan tekanan selama angin topan, temperatur *dry bulb* dan *wet bulb*, curah hujan lebat serta data sejarah banjir di sekitar tapak (banjir normal maupun ekstrim) dalam kurun selama 50 tahun.

Parameter yang digunakan untuk mengkarakterisasi bahaya karena banjir meliputi ketinggian air, ketinggian dan periode gelombang, waktu banjir, lama banjir dan kondisi aliran. Sejarah banjir dalam kurun waktu 50 tahun meliputi: (i) data debit sungai/danau maksimum harian, (ii) data banjir di wilayah terdekat dengan tapak dan informasi hidrografi banjir, tanggal kejadian, maupun level dan aliran puncak, (iii) data fenomena migrasi saluran sebagai akibat dari aliran pintas (*cut-offs*), amblesan dan pengangkatan, (iv) *rating curve* yang menunjukkan keterkaitan antara ketinggian air dengan debit dari alat ukur yang terdekat. Bahaya yang tergabung dengan kejadian banjir adalah *inundation* (peningkatan level air di tapak), kecepatan hidrodinamik struktur, penyumbatan *intake* dan *outlet* air karena sedimentasi dan puing[14].

*Storm surges* merupakan peningkatan elevasi permukaan air yang tidak normal di daerah perairan dekat pesisir dan termasuk jenis bahaya banjir. *Storm surges* dapat terjadi di daerah pesisir terbuka, badan perairan tertutup (danau) dan semi tertutup (pelabuhan)[10].

### **Geoteknik**

Kajian yang perlu dilakukan berkaitan dengan bahaya geoteknik antara lain ketidakstabilan lereng; runtuh, ambles atau terangkatnya permukaan tapak dan likuifaksi tanah[15].

### **Ketidakstabilan Lereng**

Lereng yang berpotensi bahaya dibedakan berdasarkan jarak, sudut kemiringan, ketinggian, geologi, kadar air dan kondisi geoteknik material lereng, serta analisis pengaruh gempa dan hujan lebat. Faktor yang menyebabkan ketidakstabilan lereng ada dua yaitu faktor internal dan eksternal. Faktor internal meliputi material tanah pembentuk lereng, muka air tanah, kemiringan lereng, retakan pada lereng, pelapukan tanah, dan aktivitas geologi dari lereng. Sedangkan faktor eksternal meliputi infiltrasi air hujan, aktivitas manusia, keberadaan vegetasi, rayapan lereng, dan gempa[16]. Analisis ketidakstabilan lereng memerlukan data bawah permukaan yang bisa mengakomodasi kompleksitas dan heterogenitas material tanah dan batuan yang ada pada lereng tersebut. Salah satu pendekatan metode pendugaan kondisi bawah permukaan lereng yang dapat dipakai adalah integrasi geolistrik dan geoteknik (*SPT/ Standard Penetration Test Borehole*) yang dapat menghasilkan dugaan gambaran kondisi bawah permukaan beserta properti mekanik geomaterialnya[17].

### **Runtuh, Ambles atau Terangkatnya Permukaan Tapak**

Keberadaan fitur alam maupun buatan dapat menyebabkan runtuh, ambles, atau terangkatnya permukaan tapak. Keberadaan fitur alam tersebut, antara lain formasi rongga tanah, kapur, dan fitur buatan antara lain pengaruh pengambilan fluida seperti pada sumur air, dan sumur minyak dan pengaruh kehilangan material halus dalam kondisi erosi bawah permukaan[18]. Runtuh, ambles atau terangkatnya permukaan tapak merupakan suatu permasalahan yang sangat dipengaruhi oleh sifat fisik lapisan batuan atau tanah penyusun. Metode geolistrik merupakan salah satu metode geofisika untuk pengukuran harga resistivitas batuan. Melalui analisis struktur perlapisan batuan berdasarkan nilai resistivitas, dapat diketahui jenis-jenis tanah atau batuan yang menyusun perlapisan tersebut, sehingga dapat diperkirakan potensi bahaya geoteknik tersebut. Jika ditemukan adanya rongga terbuka dan fitur berisi larutan pada kedalaman dangkal, maka kompresibilitas, potensi erosi material pengisi, dan stabilitas rongga akan dievaluasi. Analisis kualitatif dapat dilakukan dengan perbandingan ukuran struktur pondasi terhadap ukuran rongga, sedangkan secara kuantitatif dilakukan dengan analisis deformasi permukaan tapak menggunakan metode elemen hingga (*finite element method*). Jika analisis deformasi

mendapatkan nilai deformasi yang membahayakan stabilitas struktur, maka dilakukan analisis rekayasa teknik perbaikan fondasi.

### **Likuifaksi Tanah**

Likuifaksi adalah proses perubahan tanah granular jenuh dari keadaan padat menjadi keadaan cair akibat peningkatan tekanan air pori sehingga tegangan efektif tanah menurun. Likuifaksi tanah dapat merupakan salah satu efek sekunder dari gempa sehingga harus dikaji untuk tapak dengan tanah lunak. Jika tanah di area tapak rentan terhadap likuifaksi, namun perbaikan tanah dan desain pondasi yang tepat diaplikasikan, maka likuifaksi tidak dipertimbangkan sebagai bahaya pada basis desain. Namun, jika faktor keamanan untuk likuifaksi agak rendah, likuifaksi tanah harus dianalisis sebagai bahaya[19]. Tanah yang rentan likuifaksi adalah tanah yang tidak kohesif seperti pasir dan kerikil yang mengandung sejumlah kecil lumpur dan tanah liat, dan terdeposit banyak tersimpan di bawah muka air.

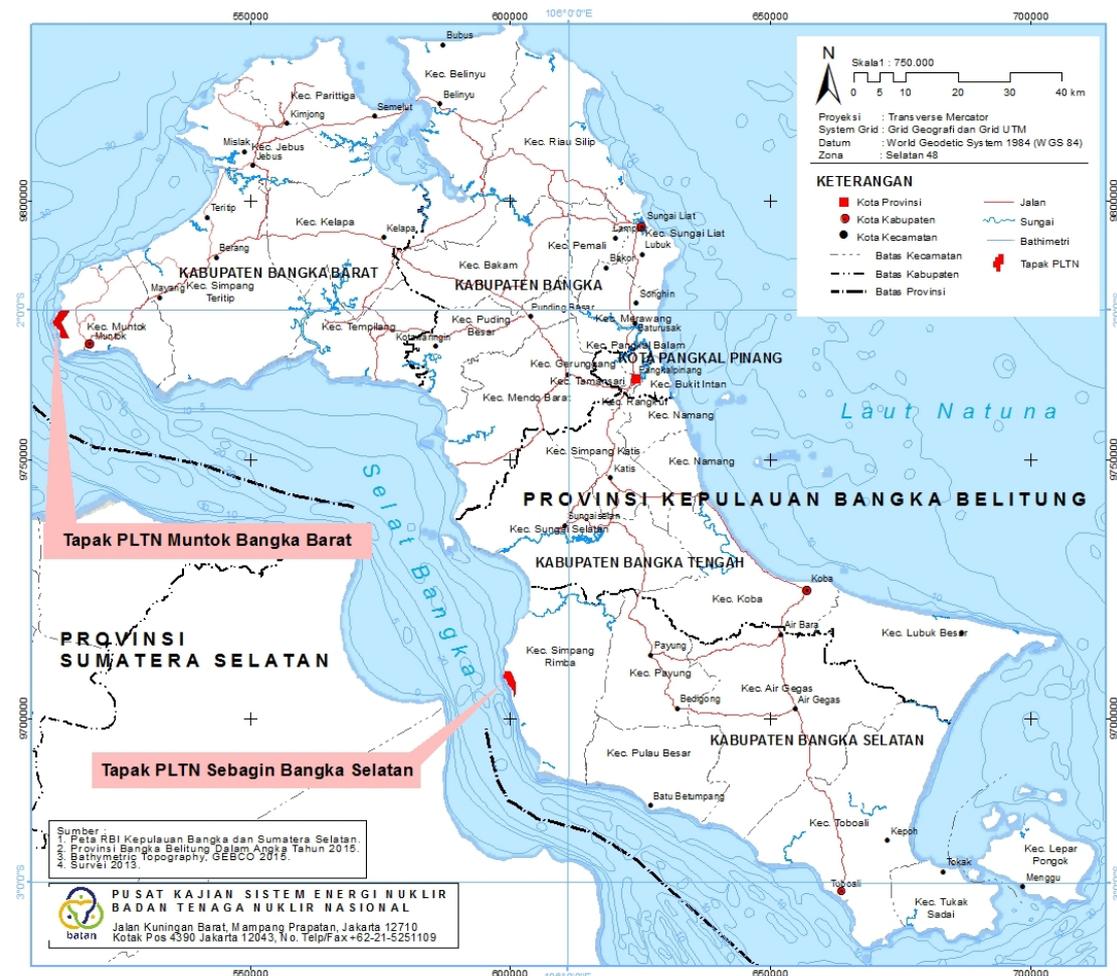
Tanah berpotensi likuifaksi, tanah tersebut tersaturasi atau akan tersaturasi, dan ketebalan serta luasan tanah cukup besar memberikan risiko. Jika pada analisis kualitatif membuktikan keberadaan potensi likuifaksi, maka dilanjutkan dengan analisis kuantitatif yaitu analisis resistensi terhadap tekanan pori berulang dan analisis karakteristik kekuatan residual tak terdrainase dari tanah berpotensi likuifaksi tersebut, untuk memperkirakan stabilitas dan deformasi paska gempa. Tahapan analisis terakhir adalah evaluasi implementasi rekayasa teknik.

### **Bahaya Gunung Api**

Aktivitas gunung api berpotensi mempengaruhi keselamatan reaktor nuklir, sehingga perlu dilakukan kajian potensi bahaya aktivitas gunung api. Investigasi kegunungapian dilakukan pada radius minimal 150 km[18]. Bahaya gunung api dapat berupa erupsi efusif (lelehan lava) dan erupsi eksplosif (letusan) dihasilkan oleh proses magmatisme (vulkanisme). Erupsi efusif, adalah letusan karena tekanan gas magmatik tidak terlalu kuat sehingga hanya menimbulkan lelehan lava melalui retakan yang terdapat pada tubuh gunung api. Erupsi eksplosif dapat menghasilkan lava (cairan silika pijar), aliran piroklastik (awan panas), abu/pasir vulkanik (jatuhan piroklastik sampai radius 5-7 km dan yang berukuran halus dapat jatuh sampai ribuan km), gas vulkanik (umumnya saat letusan freatik, seperti SO<sub>2</sub>, CO, N<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, dll), lahar letusan [20]. Selain ancaman primer, aliran lahar dapat menghasilkan ancaman sekunder diantaranya longsor karena aliran lumpur dan bebatuan dari material vulkanik yang tertimbun pada lereng, disiram air hujan hingga jenuh. Akibat tekanan gas yang sangat kuat dan temperatur yang tinggi, pada kedalaman 75-175 km, sebagian litosfer yang menyusup akan melebur membentuk magma. Adanya tekanan diapirisme, magma akan membumbung naik menuju permukaan bumi, sehingga terjadi erupsi. Endapan produk vulkanik yang terbentuk di atas batuan terdiri dari beberapa jenis dengan umur yang berbeda. Jenis endapan produk vulkanik tersebut adalah Paleosen (55,8-65,5 jt tahun), Eosen (33,9-55,8 jt tahun), Oligosen (23,03-33,9 jt tahun), Miosen (5,332-23,03 jt tahun), Pliosen (2,588-5,332 jt tahun) dan Plistosen (0,0117-2,588 jt tahun)[21].

### **METODOLOGI**

Metode yang digunakan meliputi studi pustaka terkait dengan bahaya eksternal alamiah, identifikasi berbagai jenis bahaya eksternal alamiah yang dapat membahayakan instalasi PLTN yang dominan di Calon Tapak Bangka Barat dan Bangka Selatan dan selanjutnya dilakukan analisis dengan mengadopsi kriteria keselamatan sebagai persyaratan untuk keamanan tapak PLTN. Lokasi Tapak PLTN Bangka Barat dan Bangka Selatan diperlihatkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Lokasi Tapak PLTN di Bangka Barat dan Bangka Selatan[4,5]

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasar hasil evaluasi tapak di Pulau Bangka tahun 2013, telah ditentukan dua lokasi tapak yaitu di Kabupaten Bangka Barat (Teluk Menggris Kelurahan Tanjung, Kecamatan Muntok) dan di Kabupaten Bangka Selatan (Tanjung Berani Desa Sebagin, Kecamatan Simpang Rimba)[22]. Hasil identifikasi bahaya eksternal alamiah di Tapak Bangka (Barat dan Selatan) ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Identifikasi Bahaya Eksternal Alamiah di Tapak Bangka Barat dan Bangka Selatan

No.	Parameter	Lokasi 2	
		Teluk Menggris Kabupaten Bangka Barat [4]	Tanjung Berani Kabupaten Bangka Selatan [5]
1	Gempa dan Patahan permukaan	Tidak teridentifikasi adanya sesar kapabel. Nilai PGA 0,23g.	Tidak teridentifikasi adanya sesar kapabel. Nilai PGA 0,27g.
2	Meteorologi ekstrim/jarang terjadi	Ditemukan kondisi ekstrim petir (2006-2011) 10,4-20,8 petir per tahun per km <sup>2</sup> . Angin kuat akibat siklon tropis memicu hujan deras dan puting beliung pada tahun 2007-2011 (skala fujita 0-1)	Ditemukan kondisi ekstrim petir (2006-2011) 10,4-20,8 petir per tahun per km <sup>2</sup> . Angin kuat akibat siklon tropis memicu hujan deras dan puting beliung pada tahun 2007-2011 (skala fujita 0-1)
3	Banjir	Luapan banjir Sungai Menjelang mencapai 5 m dpl. Gelombang tsunami tertinggi berasal dari zona subduksi parit Sunda dan	Luapan banjir Sungai Nembus mencapai 5 m dpl. Gelombang tsunami tertinggi berasal dari zona subduksi parit Sunda dan

		menghasilkan ketinggian 10 cm .	menghasilkan ketinggian 10 cm .
4	Geoteknik	Lapisan batuan di dominasi oleh batu pasir dan batu lempung dari formasi Tanjung Genting dan daya dukung di area tapak bervariasi antara 104,53 - 937,93 t/m <sup>2</sup> .	Lapisan batuan di dominasi oleh batu pasir dan batu lempung dari formasi Tanjung Genting dan daya dukung di area tapak bervariasi antara 47,10 - 448,33 t/m <sup>2</sup> .
5	Gunungapi	Tidak ditemukan aliran piroklastik, lava, lahar dan <i>debris avalance</i> , bukaan ven baru, proyektil, deformasi tanah dan gempa vulkanik.	Tidak ditemukan aliran piroklastik, lava, lahar dan <i>debris avalance</i> , bukaan ven baru, proyektil, deformasi tanah dan gempa vulkanik.

Kriteria penolakan terkait dengan berbagai bahaya eksternal alamiah tapak PLTN ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Kriteria Penolakan yang berkaitan dengan berbagai bahaya eksternal alamiah tapak PLTN[3].

No.	Kriteria Penolakan
1.	Tapak memiliki percepatan tanah > 0,4 g dari batuan dasar
2.	Jarak dari <i>capable fault</i> (patahan kapabel) < 5 km.
3.	Terdapat Potensi likuifaksi.
4.	Potensi ketidakstabilan lereng yang tidak bisa dikurangi dengan tindakan rekayasa.
5.	Potensi tanah runtuh/ambles/terangkatnya permukaan yang tidak dapat dimitigasi dengan tindakan rekayasa.
6.	Kemungkinan formasi dari bukit pasir, dan batu gamping

Posisi wilayah Indonesia berada di antara tiga lempeng tektonik (Eurasia, Indo-Australia dan Pasifik) sehingga menyebabkan adanya gempa di zona subduksi. Gempa yang terjadi di zona subduksi menyebabkan terjadinya sesar aktif dan sesar permukaan, yang memiliki potensi bahaya eksternal dan dalam keadaan ekstrim dapat mengancam keselamatan operasi PLTN. Sesar/patahan dapat dikenali di lapangan, seperti adanya kelurusan topografi berupa gawir, kelurusan sungai, kelurusan lembah, zona hancuran batuan, dan juga dari sejarah gempa/katalog gempa yang merusak. Pensesaran permukaan dilakukan dengan mengidentifikasi potensi patahan, kekar dan jejak batuan yang terjadi dalam radius 5 km dan potensi bahaya percepatan tanah[23]. Dalam Perka BAPETEN No. 8 Tahun 2013 disebutkan bahwa percepatan tanah puncak di tapak dengan periode ulang 10.000 tahun tidak boleh melampaui 0,6 g pada level pondasi. Pada Tabel 1 terlihat bahwa tapak Bangka mempunyai nilai PGA kurang dari 0,6 g sehingga dikategorikan aman dan memenuhi persyaratan BAPETEN. Selain itu di kedua tapak tersebut juga tidak teridentifikasi adanya sesar kapabel.

Data kondisi meteorologi ekstrim/jarang terjadi berdasarkan nilai MRI (*Mean Recurrence Interval*)/periode ulang dan data sejarah diperlihatkan pada Tabel 3. MRI adalah waktu antara dua kejadian berturut-turut, yang sama atau lebih tinggi dari rata-rata kejadian dalam jumlah besar. Berdasar Perka BAPETEN No. 5 Tahun 2008 tentang pedoman evaluasi tapak reaktor daya untuk aspek meteorology, meteorologi jarang terjadi meliputi puting beliung, siklon tropis dan kilat (petir).

Tabel 3. MRI Untuk Parameter Meteorologi[24]

Bahaya eksternal alamiah	Parameter	MRI (Tahun)
Kecepatan angin	a. Angin Ekstrim (digunakan untuk kajian keselamatan terhadap angin yang menginduksi missil).	1000
	b. Angin kencang	1000
Curah hujan harian	Maksimum curah hujan harian (digunakan untuk perkiraan DBF)	1000
Angin angin topan	Penurunan tekanan	1000

Pada Tabel 3 dinyatakan bahwa dalam periode ulang 1000 tahun tidak dikehendaki adanya bahaya eksternal alamiah dengan parameter seperti pada tabel tersebut. Temperatur ekstrim yang tiba-tiba atau berkepanjangan berpengaruh pada SSK (Struktur Sistem dan Komponen) instalasi diantaranya *intake* udara pendingin, selain itu juga kondensasi dan penguapan diantaranya komponen elektronik [25]. Potensi angin kencang diantaranya misil yang dapat berdampak juga pada SSK atau catu daya *off-site*, rencana pelaksanaan kedaruratan dan pelepasan radioaktif ke lingkungan. Frekuensi dan intensitas angin kencang, termasuk tornado dan angin topan dinilai berdasarkan data historis dan rekaman. Pada Tabel 1 terlihat bahwa kondisi meteorologi ekstrim/jarang terjadi yang terjadi di tapak Bangka adalah angin kuat akibat siklon tropis yang memicu hujan deras. Puting beliung yang terjadi di Pulau Bangka pada periode 2007-2011 dengan intensitas skala fujita 0-1. Untuk margin keselamatan pembangunan PLTN maka dapat diusulkan skala fujita 2[4,5].

Potensi bahaya banjir selain berasal dari hujan lebat, semua sumber lain juga harus dipertimbangkan, termasuk kejadian tsunami (banjir pantai), banjir sungai, gempa yang menyebabkan retaknya waduk dan danau, tersumbatnya sistem drainase bersamaan dengan hujan deras dan skenario potensi lainnya. Banjir pada tapak PLTN berdampak pada SSK, sedangkan efek infiltrasi air (air masuk dalam tanah) dan dinamika kadar air tanah dapat berpengaruh pada pondasi bangunan. Jika banjir membawa aliran es maupun serpihan lain, dapat merusak sistem drainase dan jalur/pipa *inlet* air pendingin. Banjir yang terjadi di luar instalasi mengakibatkan terjadinya erosi pada batas tapak. Efek banjir juga mempengaruhi dispersi bahan radioaktif. Pada Tabel 1 terlihat di tapak Bangka, luapan banjir sungai maksimum yang mungkin terjadi adalah 5 m dpl, sehingga diusulkan PLTN dibangun pada elevasi sekitar 7 m dpl. Sedangkan karena ketinggian gelombang tsunami maksimal 10 cm, maka dapat diusulkan desain dengan mempertimbangkan faktor keamanan untuk gelombang tsunami tertinggi adalah 1 m.

Kondisi ketidakstabilan lereng di daerah tapak dapat ditanggulangi dengan tindakan rekayasa teknik sehingga tapak diterima. Tergantung pada kondisi tapak, likuifaksi dapat menyebabkan diantaranya kegagalan aliran, *lateral spread*, hilangnya kekuatan bantalan, turunnya muka tanah (bangunan ambles dan juga miring). Kemiringan dapat menyebabkan kegagalan mekanis pada struktur yang semula tahan dari vibrasi gerakan yang kuat. Likuifaksi dapat menyebabkan pergeseran antara bangunan dengan bagian bangunan, pergeseran antara bangunan dan perpipaan & kabel bawah tanah (dapat membahayakan jalur komunikasi). Berkaitan dengan likuifaksi, tapak ditolak jika memiliki wilayah labil dengan sering terjadi gempa berskala besar dan memiliki pelapisan pasir sedimen. Sedangkan berkaitan dengan kondisi pondasi, perbaikan pondasi harus dilakukan jika bahan pondasi tidak mampu menyangga beban bangunan tanpa deformasi yang tidak diinginkan (penurunan muka tanah), terdapat rongga yang dapat menyebabkan ambles, terdapat heterogenitas pada skala ukuran bangunan yang dapat menyebabkan pengangkatan atau ambles. Pada Tabel 1 terlihat di tapak Bangka Barat daya dukung tanah untuk pondasi bervariasi antara 104,53 -937,93 t/m<sup>2</sup>, sedangkan di tapak Bangka Selatan bervariasi antara 47,10 -448,33 t/m<sup>2</sup>. Nilai ini memenuhi syarat (baik) untuk konstruksi PLTN.

Beberapa jenis fenomena vulkanik yang memberikan potensi bahaya gunungapi sehingga diperlukan pertimbangan dalam penerimaan tapak dan desain ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Pertimbangan Fenomena Vulkanik[18]

Jenis Fenomena	Pertimbangan utama:		SDV (km)
	Penerimaan tapak	Desain instalasi	
Proyektil balistik	x	x	5 (diameter butir 5 cm)
Jatuhan bahan piroklastik		x	1000 (tebal endapan 15 cm)
Aliran dan gelombang piroklastik	x		50
Kejutan udara dan petir		x	5
Aliran lava	x		15
Longsor bahan rombakan, tanah dan runtuh lereng	x	x	50
Aliran bahan rombakan, lahar dan banjir	x	x	50
Gas-gas vulkanik		x	5

Deformasi tanah	x		5
Gempa vulkanik		x	15
Anomali geothermal (hydrothermal)	x	x	5
Pembukaan lubang baru	x		20

Adanya kegiatan vulkanik berupa lava, piroklastik atau lahar sebagai hasil dari kegiatan vulkanisme kuarter dan daerah yang terlewati produk gunung api tersebut cenderung menjadi tidak kapabel dan calon tapak dapat menjadi tapak potensial. Jika hasil indentifikasinya merupakan produk gunungapi tua (>Tersier) maka calon tapak dapat menjadi daerah yang dipertimbangkan atau tergantung hasil analisis probabilitiknya. Terlihat pada Tabel 1 bahwa di kedua tapak tidak ditemukan aliran piroklastik, lava, lahar dan *debris avalance*, bukaan ven baru, proyektil, deformasi tanah dan gempa vulkanik. Sehingga berdasar Tabel 3, kedua tapak aman dari fenomena bahaya gunung api.

### KESIMPULAN

Potensi bahaya eksternal alamiah dalam pemilihan tapak PLTN meliputi aspek kegempaan dan sesar permukaan, meteorologi ekstrim/jarang terjadi, banjir (sungai dan tsunami), geoteknik, dan kegunungapian. Hasil identifikasi tapak PLTN di Teluk Menggris Kabupaten Bangka Barat dan Tanjung Berani Kabupaten Bangka Selatan menunjukkan bahwa tapak-tapak tersebut aman dari potensi bahaya eksternal alamiah. Di tapak Bangka tidak teridentifikasi adanya sesar kapabel dan nilai PGA kurang dari 0,6 g sehingga dikategorikan aman dan memenuhi persyaratan BAPETEN. Lapisan batuan di dominasi oleh batu pasir dan batu lempung dari formasi Tanjung Genting, serta nilai daya dukung di area tapak memenuhi syarat untuk konstruksi PLTN. Nilai daya dukung tanah untuk pondasi di tapak Bangka Barat bervariasi antara 104,53 -937,93 t/m<sup>2</sup>, sedangkan di tapak Bangka Selatan bervariasi antara 47,10 -448,33 t/m<sup>2</sup>. Di tapak juga tidak ditemukan potensi bahaya gunung api. Potensi meteorologi ekstrim/jarang terjadi di tapak Bangka berupa petir (2006-2011) 10,4-20,8 petir per tahun per km<sup>2</sup>. Angin kuat akibat siklon tropis memicu hujan deras dan puting beliung pada tahun 2007-2011 berskala fujita 0-1, dapat menggunakan margin keselamatan berskala fujita 2. Luapan banjir sungai di tapak Bangka dengan ketinggian 5 m dpl, dapat menggunakan margin keselamatan elevasi bangunan PLTN sekitar 7 m dpl. Pada Nilai ini memenuhi syarat (baik) untuk konstruksi PLTN.

### UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih penulis sampaikan kepada Kepala Pusat Kajian Sistem Energi Nuklir (PKSEN)-BATAN yang telah memberi kesempatan untuk melakukan penelitian ini dan Kepala Bidang Kajian Data Tapak yang telah mengarahkan dan memberi masukan dalam penelitian ini.

### DAFTAR PUSTAKA

1. HADI SUNTOKO, "Kajian Aspek Keselamatan Tapak PLTN di Ujung Lemah Abang, Sebagai Lokasi yang Aman dari Bahaya Kejadian Eksternal Alamiah", Jurnal Pengembangan Energi Nuklir Vol. 2 No. 2, Desember 2010.
2. IAEA "Site Evaluation for Nuclear Installations", IAEA Safety Standards No. NS-R-3, Safety Requirements, Vienna, 2016.
3. ROSHAN A.D., et.al., "Monograph on Siting of Nuclear Power Plant", Atomic Energy Regulatory Board, Mumbai India.
4. BATAN. "Ringkasan Eksekutif Studi kelayakan PLTN di Bangka Barat", BATAN, 2013.
5. BATAN. "Ringkasan Eksekutif Studi kelayakan PLTN di Bangka Selatan", BATAN, 2013.
6. PP No.43, TAHUN 2006, Tentang Perizinan Reaktor Nuklir.
7. PERKA BAPETEN NOMOR 5 TAHUN 2007, Tentang Ketentuan Keselamatan Evaluasi Tapak Reaktor Nuklir.
8. KURNIA ANZHAR, dkk., "Kajian Percepatan Tanah Maksimum Di Daerah Interes Untuk Tapak Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) Provinsi Kalimantan Timur", Prosiding Seminar Nasional Pengembangan Energi Nuklir III, PPEN, BATAN, 2010.
9. IAEA, "A Methodology to Assess the Safety Vulnerabilities of Nuclear Power Plants Against Site Specific Extreme Natural Hazards", IAEA Safety Related Publications, 2011.
10. IAEA, "Earthquakes and Associated Topics in relation to Nuclear Power Plant Siting" Safety series no. 50-SG-S1 (rev.1), IAEA Vienna, 1991.

11. HADI SUNTOKO, dkk., "Tinjauan Aspek Pensesaran Permukaan Regional Terhadap Keselamatan PLTN di Banten", *hadisuntoko.blogspot.com/2010/07/pensesaran-permukaan-di-banten.html*, diakses Maret 2018.
12. SUPARTOYO, SURONO, DAN PUTRANTO, E.T., 2014, Katalog Gempabumi Merusak Indonesia Tahun 1612 – 2014 (Edisi Kelima), Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, Badan Geologi, Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral : hal 121.
13. GOVERNMENT OF INDIA, "Axtreme Values of Meteorological Parameters", AERB Safety Guide, Guide No. AERB/NF/SG/S-3, Mumbai, May 2008.
14. BURGAZZI, L, et.al., "Risk Analysis of Nuclear Power Plants Against External Events", Report Ricerca Di Sistema Elettrico, September 2014.
15. IAEA, "Geotechnical Aspects of Site Evaluation and Foundation for Nuclear Power Plants", IAEA Safety Standards Series No. NS-G-3.6, Vienna, 2004.
16. APRI LURIYANTO, et.al., "Analisis Stabilitas Lereng dan Alternatif Penanganannya : Studi Kasus Longsoran Pada Ruas Jalan Pringsurat Km. Mgl." Jurnal Karya Teknik Sipil, Volume 3, Nomor 4, Tahun 2014.
17. ARDY ARSYAD, dkk., "Studi Kestabilan Lereng Pada Jalan Poros Majene-Mamuju dengan Integrasi Intepretasi Data Geolistrik Dan Geoteknik SPT-Borehole", Kolokium Jalan dan Jembatan, Makasar, 2013.
18. BATAN, "Program Evaluasi Tapak RDE", Dokumen Program Evaluasi Tapak RDE di kawasan Puspipetek Serpong, Rev. 04, 2014.
19. TAMAS JANOS KATONA et.al., "Assessment of Liquefaction Consequences for Nuclear Power Plant Paks", Conference SMIRT 23, United Kingdom, August, 2015.
20. NANDI, "Vulkanisme", Handouts Geologi Lingkungan, Jurusan Pendidikan Geografi, UPI, 2006.
21. INTERNATIONAL COMMISSION ON STRATIGRAPHY, "International Stratigraphic Chart", <http://www.stratigraphy.org/ICSchart/StratChart2009.pdf>, diakses Maret 2018.
22. PKSEN, BATAN. "Pemantauan Tapak PLTN di Pulau Bangka" Laporan Akhir Bidang KDT, BATAN, 2017.
23. BATAN, "Aspek Kegempaan", Laporan Evaluasi Tapak Reaktor Daya Eksperimental Kawasan Puspipetek Serpong Revisi 4, 2017.
24. MINISTER OF PUBLIC WORKS AND GOVERNMENT SERVICES CANADA, "Site Evaluation for New Nuclear Power Plants", Regulatory Document, RD-346, Canadian Nuclear Safety Commission, Nov. 2008.
25. AKHMAD KHUSYAIRI, "Kajian Aspek Hidrologi Dalam Evaluasi Tapak PLTN Sesuai Dengan DS 417", Prosiding Seminar Nasional Pengembangan Energi Nuklir IV, PPEN, BATAN, 2011.

#### **DISKUSI/TANYA JAWAB :**

##### **1. PERTANYAAN :**

Dari hasil kajian potensi bahaya eksternal alamiah, mana dari tapak Bangka Barat dan Bangka Selatan yang mempunyai potensi bahaya eksternal alamiah yang lebih kecil ?

##### **JAWABAN :**

Berdasar hasil identifikasi terlihat bahwa :

- Potensi bahaya gempa/patahan permukaan di Bangka Barat lebih kecil, yaitu nilai PGA 0,23g.
- Potensi bahaya meteorologi ekstrim, banjir, gunung api di Bangka Barat dan Selatan adalah sama.
- Potensi bahaya geoteknik di Bangka Selatan lebih rendah, namun demikian potensi bahaya geoteknik di Bangka Barat masih memenuhi kriteria yang ditetapkan.

Sehingga dapat disimpulkan bahwa potensi bahaya eksternal alamiah di Bangka Barat lebih kecil.

##### **2. PERTANYAAN :**

Apa hubungan Fenomena vulkanik dengan proyektil balistik (diameter butir 5 cm)

##### **JAWABAN :**

Proyektil balistik dimaksudkan volumenya besar dan temperatur sangat tinggi (dapat mencapai 900°C), sehingga jika mengenai reaktor akan membahayakan reaktor. SDV fenomena vulkanik ini merupakan standar IAEA.

## KAJIAN AWAL KAWASAN LEPAS PANTAI DI INDONESIA SEBAGAI LOKASI TAPAK PLTN

**Sahala Maruli Lumbanraja, Rr. Arum Puni Rijanti**

Pusat Kajian Sistem Energi Nuklir-BATAN  
Jl. Kuningan Barat, Mampang Prapatan-Jakarta  
Telp./Fax: 021-5204243  
e-mail: [sahalal@batan.go.id](mailto:sahalal@batan.go.id)

### ABSTRAK

#### KAJIAN AWAL LEPAS PANTAI INDONESIA SEBAGAI LOKASI TAPAK PLTN.

Kebutuhan energi listrik dan air bersih di daerah terpencil (*remote area*) merupakan cikal bakal pengembangan PLTN di lepas pantai (*Offshore Nuclear Power Plant, ONPP*). Paska kecelakaan PLTN Fukushima Daiichi pengembangan ONPP semakin gencar dilakukan oleh berbagai negara. Tapak PLTN dilepas pantai mempunyai kelebihan dibandingkan tapak PLTN di darat khususnya ketersediaan pendingin yang tidak terbatas. Tujuan studi adalah untuk mengkaji kawasan lepas pantai sebagai lokasi tapak PLTN di Indonesia. Kajian dilakukan dengan metoda SWOT (*Strength, Weaknesses, Opportunities, Threats*) terhadap lokasi tapak sesuai dengan teknologi ONPP, dan regulasi yang dibutuhkan. Dari analisis awal dari segi kekuatan (*strength*), dan kesempatan (*opportunities*) diperoleh hasil bahwa kawasan lepas pantai untuk lokasi tapak PLTN lebih menguntungkan dibandingkan lokasi tapak di darat, yaitu kawasan pesisir pantai timur pulau Sumatera, kawasan pantai utara pulau Jawa, dan kawasan pantai pulau Kalimantan, sedangkan dari segi kelemahan (*weaknesses*), dan ancaman (*threats*) masih dibutuhkan studi lebih lanjut untuk mengetahui karakteristik lepas pantai. Regulasi nasional dan internasional masih perlu dikaji lebih lanjut khususnya regulasi pengangkutan instalasi nuklir antar negara.

Kata kunci: tapak lepas pantai, ONPP, regulasi

### ABSTRACT

#### THE PRE-ASSESSMENT OF THE INDONESIAN OFFSHORE AS A LOCATION

**SITE OF NPP.** The need for electricity and clean water in remote areas is the forerunner to the development of the Offshore Nuclear Power Plant (ONPP). After the Fukushima nuclear power plant accident, the development of ONPP was increasingly carried out by various countries. The location of offshore nuclear power plants has advantages compared to the onshore land stations, especially the availability of unlimited cooling. The aim of the study was to study the offshore area as a location for nuclear power plants in Indonesia. The study is carried out by the SWOT (Strength, Weaknesses, Opportunities, Threats) method on the site location in accordance with ONPP technology, and the required regulations. From the initial analysis in terms of strength (*strength*), and opportunities (*opportunities*) obtained results that the offshore area for the PLTN site is more profitable than the site on land, namely the east coast of Sumatra, the north coast of Java, and the coastal area. Kalimantan island, while in terms of weaknesses and threats, further studies are needed to find out the characteristics of offshore. National and international regulations still need to be studied further, especially the regulation of the transportation of nuclear installations between countries.

Keyword: offshore site, ONPP, regulation

### PENDAHULUAN

Berbagai alasan yang melatarbelakangi pengembangan teknologi PLTN lepas pantai (*Offshore Nuclear Power Plant, ONPP*) seperti kebutuhan energi listrik dan air bersih di kawasan terpencil; keterbatasan lokasi tapak di darat yang dapat menyediakan pasokan air pendingin dan air untuk kebutuhan lainnya; penolakan dari kalangan lembaga swadaya masyarakat (LSM) anti nuklir dengan slogan BANANA (*Build Absolutely Nothing Anywhwhere Near Anybody*) dan dari masyarakat di calon tapak PLTN dengan slogan NIMBY (*Not In My Backyard*)[1,2,3]. Rusia telah mengembangkan dan akan mengoperasikan KLT-40S untuk memenuhi kebutuhan energi listrik dan/atau air bersih di kawasan terpencil (*remote area*).

Cina juga sedang membangun ACR-50S yang akan dioperasikan dengan tujuan yang sama. Sedangkan Amerika Serikat, Korea Selatan dan Perancis masih dalam phase konseptual desain.

Lokasi tapak ONPP ada tiga jenis yang didasarkan pada jenis teknologinya dan kedalaman laut yang dibutuhkan. Pertama, lokasi tapak PLTN tipe Apung (*Floating Nuclear Power Plant, FNPP*) yang terdiri dari jenis yaitu tapak laut dangkal dengan kedalaman minimal 30 m (PLTN tipe tongkang atau *barge*) dan tapak pantai laut dalam dengan kedalaman antara 60 hingga 100 m (PLTN tipe Spar). Kedua, teknologi PLTN berbasis gravitasi (*NPP Gravity Based Structure, GBS*) dimana lokasi tapaknya berada agak jauh dari tepi pantai dengan kedalaman antara 30 m hingga 40 m sesuai dengan bobot PLTN tersebut. Ketiga, lokasi tapak PLTN di bawah permukaan air dimana PLTN ditenggelamkan di laut dan PLTN ini disebut sebagai *NPP Submerged*. Menurut Standring, W.J.F. sejumlah negara akan mengoperasikan ONPP untuk menyelesaikan persoalan kebutuhan pasokan listrik, dan air bersih mereka [4].

Indonesia berada di wilayah cincin api aktif (*ring of fire*) karena diapik tiga (3) subduksi lempeng Eurasia di bagian Utara, lempeng Indo-Australia di bagian Selatan, dan lempeng Pasifik di Timur. Ketiga lempeng ini menghasilkan puluhan sesar aktif dan zona subduksi. Lempeng Eurasia yang melewati Indonesia berada di sepanjang wilayah barat pulau Sumatera. Lempeng Indo-Australia berada di sepanjang wilayah Selatan Indonesia, mulai dari bagian Barat Jawa hingga wilayah Nusa Tenggara, sedangkan sesar Pasifik berada mulai dari Selatan Nusa mulai dari bagian utara hingga bagian selatan yang dikenal dengan daerah sesar Asia-Australia pulau wilayah selatan pulau Jawa dan menyambung

Tujuan studi ini adalah untuk mengkaji kemungkinan pendayagunaan Kawasan lepas pantai (*offshore*) sebagai calon tapak PLTN di Indonesia.

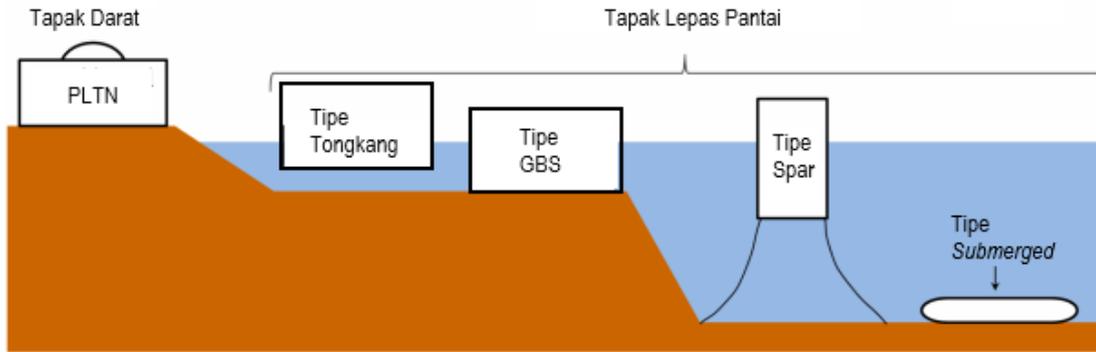
## TEORI

Menurut Fischer dan Fox dalam P.V. Thangam menunjukkan bahwa kategori utama kendala dalam pemilihan lokasi adalah (i) pertimbangan ekonomi, (ii) ergonomis dan (iii) lingkungan[5]. Menurut Klepper dan Anderson dalam P.V. Thangam faktor utama yang membatasi tapak lepas pantai, yaitu (i) persyaratan keterpencilan dari kawasan berpenduduk; (ii) kedalaman laut; dan (iii) jarak pemisah dari pantai ke PLTN untuk mengurangi dampak visual dan estetika[5].

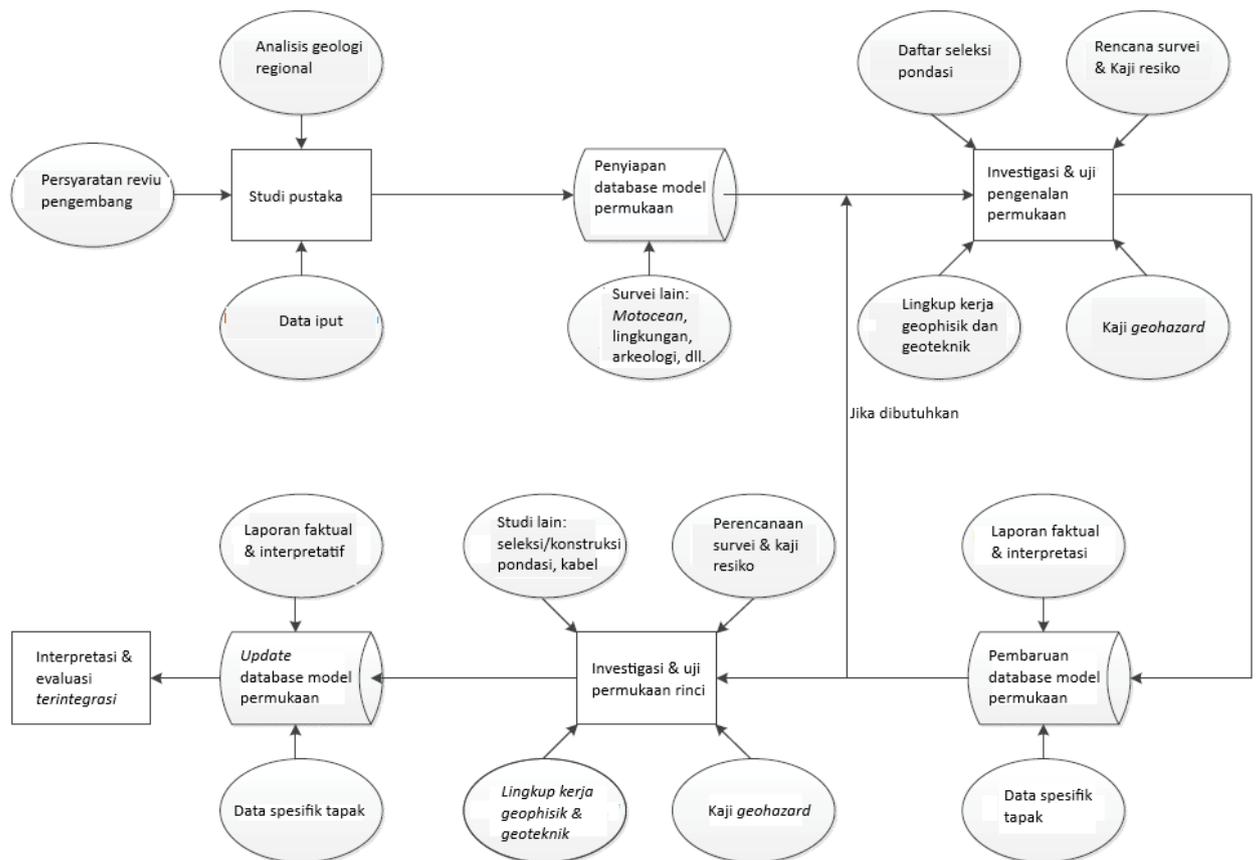
Faktor-faktor dasar yang mempengaruhi keputusan penentuan tapak adalah: (i) ketersediaan air pendingin dalam jumlah besar; (ii) dekat dengan pusat beban; dan (iii) karakteristik geologi dan seismik dengan jarak cukup aman dari daerah pemukiman penduduk. Kawasan lepas pantai yang akan didayagunakan sebagai lokasi tapak PLTN mempunyai kelebihan dan kekurangan dibandingkan dengan lokasi tapak di darat. Lokasi tapak lepas pantai dari berbagai tipe teknologi ONPP ditunjukkan pada Gambar 1. Lokasi tapak PLTN Apung berada di kedalaman yang berbeda, yaitu di laut dangkal (Tipe Tongkang) dan di laut dalam (tipe Spar). Lokasi tapak PLTN tipe GBS berada di kedalaman minimal 30 m hingga 40 m yang disesuaikan dengan bobot total PLTN [6,7,2]. Sedangkan lokasi tapak PLTN tipe *Submerged* berada di kedalaman antara 60 m hingga 100 m. Manfaat tapak di lepas pantai adalah reaktor dapat menggunakan laut sebagai pendingin tak terbatas (*infinite heat sink*)[8,2]

Ada tiga jenis ONPP yang telah dibangun dan yang sedang dikembangkan, yaitu: tipe Apung, tipe GBS, dan tipe *submerged*. ONPP tipe Apung dikembangkan oleh Rusia (KLT-40S), Cina (ACR-50S) dan Amerika Serikat (OSMR), ONPP tipe GBS dikembangkan oleh Korea Selatan (SMART, AP-1400), serta ONPP tipe *submerged* dikembangkan oleh Perancis (Flexblue).

Menurut Thangam, P.V. lokasi tapak ONPP di kawasan lepas pantai harus mempertimbangkan kondisi fisik tapak lepas pantai dan kondisi lingkungan[5]. Survei tapak lepas pantai harus mempertimbangkan persyaratan teknik seperti keselamatan, filososfi rancang bangun, dan stabilitasnya. Kondisi fisik tapak yang sesuai dengan persyaratan yang ditetapkan perlu dilakukan survei, seleksi dan investigasi tapak lebih detil. Beberapa parameter yang diketahui yaitu kekuatan angin, tinggi gelombang, kecepatan arus, gempa bumi, gerakan laut (*seaquakes*), tsunami, tornado, kekuatan *mooring* (janggar, kabel, sistem *mooring*, posisi dinamik). Diagram alir survei, seleksi dan investigasi tapak ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 1. Berbagai lokasi tapak PLTN[9]



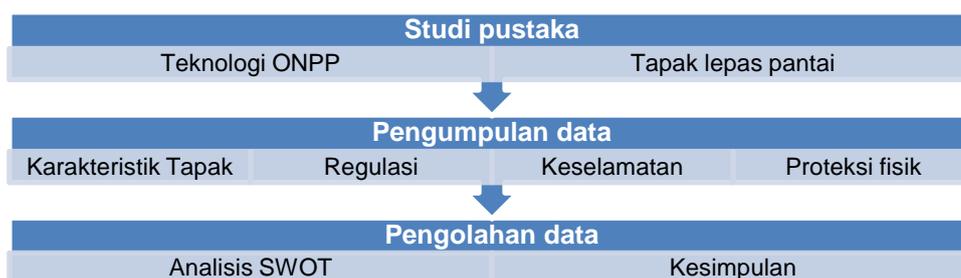
Gambar 2. Diagram alir evaluasi tapak PLTN lepas pantai[10]

Ide awal yang melandasi negara tertentu mengembangkan teknologi PLTN lepas pantai adalah kebutuhan energi listrik, energi panas dan/atau air bersih di daerah-daerah terpencil (*remote area*), serta sulit mensuplai bahan bakar fosil ke lokasi tersebut. Paska kecelakaan PLTN Fukushima, Korea Selatan mengembangkan PLTN lepas pantai untuk meminimalisir kecelakaan PLTN akibat kegagalan suplai pendingin. Ada tiga (3) jenis teknologi PLTN lepas pantai yang didasarkan pada lokasi dan kedalaman laut yaitu (i) PLTN tipe Apung (*floating*), (ii) PLTN *gravity based-structure*, dan (iii) PLTN *submerged*. Jenis teknologi PLTN lepas pantai yang sedang dikembangkan dan telah dioperasikan di dunia ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Nama dan pengembang ONPP di Dunia

No	Nama PLTN	Pengembang	Daya (MWe)	Status
1	KLT-40[12,11]	OKBM Rusia	35	Operasi 2019
2	Flexblue[13-15]	DCNS Perancis	160	Konseptual
3	ONPP (SMART)[16,17,7]	KAERI Korea	100	Konseptual
4	ONPP (AP-1400) [6,7,11]	KAERI Korea	1400	Konseptual
5	OSMR [11]	MIT- Amerika Serikat	1100	Konseptual
6	ACPR-50S [18]	CGN Cina	60	Kontruksi

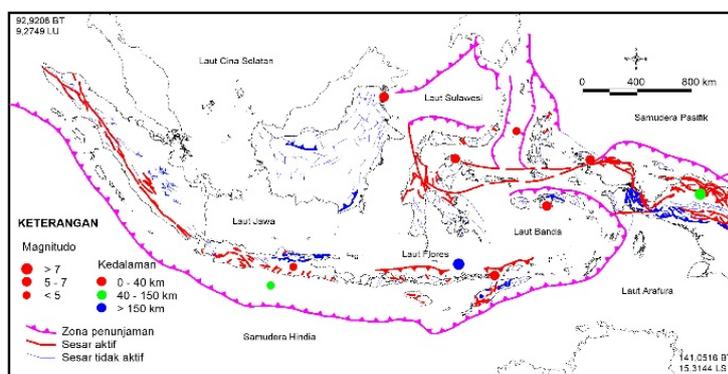
## METODE



Gambar 3. Alur metoda kajian tapak lepas pantai

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Indonesia mempunyai panjang garis pantai sepanjang 81.000 km, sehingga sangat besar kemungkinan untuk dimanfaatkan sebagai lokasi tapak PLTN lepas pantai, tetapi sebagian berada di kawasan cincin api, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Peta zona penunjaman, sesar aktif dan sesar tidak aktif Indonesia[19,16]

Secara umum, tapak lepas pantai menawarkan beberapa keuntungan, yaitu sumber pendingin sangat melimpah, pilihan tapak lebih banyak, mudah disesuaikan dengan keinginan pelanggan, dan penyiapan tapak lebih sederhana dibandingkan tapak di darat. Sedangkan kelemahannya adalah kemungkinan kontaminasi zat radioaktif pada sistem ekologi laut lebih rentan, biaya operasional & pemeliharaan lebih tinggi karena pekerja dan material yang dibutuhkan harus diangkut dari tapak ke tepi pantai maupun sebaliknya, dan sistem kesiapsiagaan nuklir lebih kompleks karena berada di area terbuka.

Lokasi tapak di dasar permukaan laut (offshore) harus mempertimbangkan kondisi permukaan dasar laut, seperti fenomena kekeruhan arus laut (*turbidity current*), *freak current* ( arus laut yang berubah setiap saat), daerah patahan, kegempaan (tektonik), ketidakstabilan permukaan dasar laut dan lain-lain.

Pembangunan dan persiapan tapak untuk penambatan ONPP akan mengganggu lingkungan laut yang ada. Pengerukan tapak lepas pantai akan mengganggu dasar laut selama konstruksi. Pengerukan ini operasi akan mencakup persiapan lokasi baik untuk

pemecah gelombang dan untuk jalur dasar laut dari kabel transmisi yang menuju ke pantai. Kerusakan besar yang disebabkan oleh operasi pengerukan akan terjadi dari kehancuran benthos dan dari kekeruhan dan pendangkalan[20].

Pengaruh operasional ONPP ini terhadap biota laut dan lingkungan hidup di sekitar tapak diakibatkan oleh, pelepasan sejumlah kecil klorin dan produk korosif seperti nikel dan tembaga, emisi radiasi tingkat rendah yang dikenal sebagai kontaminasi perimeter, penurunan populasi biota laut tertentu akibat disipasi bahang (*heat dissipation*) dan *stress thermal*[20]. Menurut Orr & Dotson dan P.V. Thangam], keuntungan yang signifikan dari pembangkit listrik lepas pantai adalah (i) pasokan air pendingin yang tidak terbatas; (ii) area luas untuk disipasi panas; (iii) ketersediaan tapak tambahan untuk pembangkit listrik dan pengentasan tekanan terhadap industri di lokasi perkotaan; (iv) penghematan waktu karena persiapan simultan dan pembangunan pabrik dua lokasi yang berbeda; (v) penghematan dalam biaya-biaya tertentu: (a) ekonomi dalam transmisi karena penempatan di dekat area permintaan daya, (b) pengurangan dalam upaya yang diperlukan untuk perizinan oleh badan pengatur karena desain standar, (c) kemungkinan menemukan beberapa unit identik di satu tapak; (vi) waktu konstruksi yang lebih singkat dan jaminan kualitas yang lebih baik karena pendekatan lini produksi; (vii) penghapusan polusi panas, udara dan kebisingan di darat dan kontaminasi air minum dengan tingkat radioaktivitas yang lebih rendah; (viii) penghindaran kebutuhan akan area luas dari tanah yang tidak diduduki yang diperlukan untuk memenuhi tindakan pencegahan keselamatan; (ix) mengurangi bahaya dari tsunami; (x) potensi biaya modal yang lebih rendah; (xi) konsep tujuan ganda pembangkit listrik tenaga nuklir dan desalinasi air laut dengan mobilitas untuk daya dan lokasi kekurangan air di sepanjang pantai; dan (xii) bantalan terhadap gempa bumi[21,5].

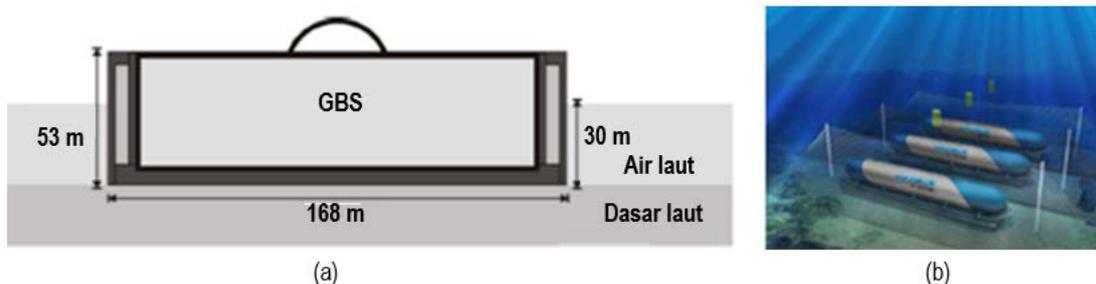
**Tapak PLTN Apung.** Teknologi PLTN Apung ada dua tipe yaitu tipe Tongkang dan tipe Spar. Persyaratan tapak PLTN tipe Tongkang adalah berada dekat ke bibir pantai, kecepatan arus laut mendekati nol (tenang), dan kedalaman laut minimal 30 m (tergantung bobot PLTN). Untuk mendapatkan kecepatan arus laut yang tenang, maka pemecah gelombang laut dan penahan arus laut harus dibangun, seperti ditunjukkan pada Gambar 5. Tapak PLTN tipe Spar berada di laut dalam dengan kedalaman minimal 70 m hingga 100 m. PLTN ini ditambatkan di dasar laut, seperti ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 5. Tapak PLTN Apung tipe Tongkang[22]

**Tapak PLTN tipe GBS.** Tapak PLTN berada di lepas pantai yang dangkal dengan sistem pondasi yang umum digunakan pada pondasi pengeboran minyak/gas lepas pantai. Area tapak yang dibutuhkan adalah area dengan dasar pantai landai karena PLTN ini diletakkan tepat di dasar laut. Kondisi dasar laut dan kedalaman laut merupakan parameter utama pada konstruksi dan instalasi, dimana kedalaman laut yang dibutuhkan adalah kira-kira 30 m. Posisi PLTN tipe GBS ketika diletakkan pada tapak dasar laut ditunjukkan pada Gambar 6.a.

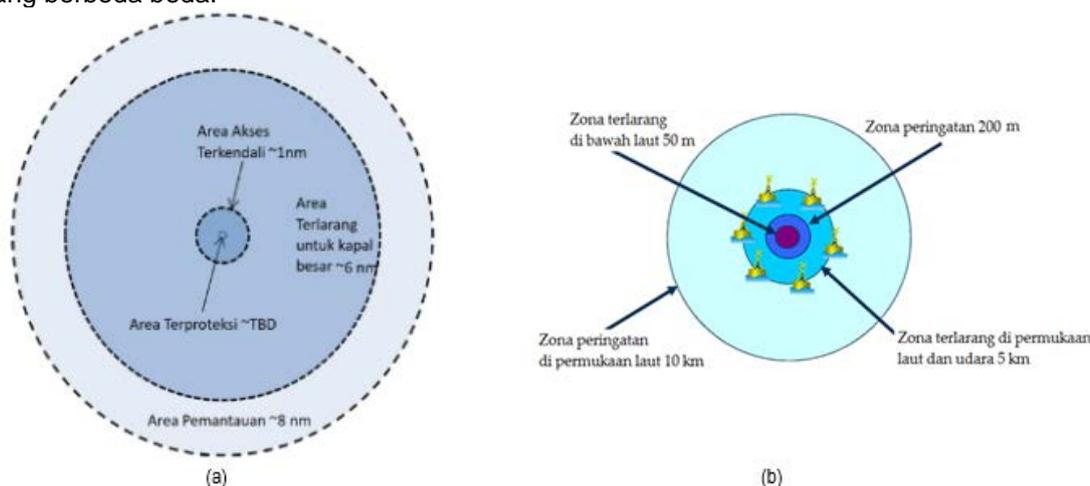
**Tapak PLTN tipe Submerged.** Menurut penelitian yang dilakukan oleh DCNS, kedalaman antara 60 hingga 100 m mempunyai arus di permukaan dasar laut dalam kondisi relatif stabil[14,15]. Lokasi tapak harus mempertimbangkan jarak dari tepi pantai, kedalaman laut, tinggi gelombang laut, ketinggian tsunami, laju arus laut, pusat gempa, dan jalur pelayaran. PLTN tipe Submerged ditenggelamkan dan ditambatkan di dasar laut pada kedalaman antara 60 hingga 100 m, seperti ditunjukkan pada Gambar 6.b.



Gambar 6. Posisi (a) PLTN tipe GBS[16,17] dan (b) PLTN tipe *Submerged* berada di dasar laut[13-15]

**Regulasi.** Regulasi yang diterbitkan oleh IAEA tidak secara spesifik mengatur implementasi PLTN di darat maupun di laut. Regulasi yang diterbitkan hanya bersifat umum. *Internasional Maritim Organisation* (IMO) telah mengadopsi regulasi keselamatan nuklir yang tertuang pada Resolution A.491(XII) tahun 1981 untuk kapal laut meskipun belum pernah diimplementasikan tapi tetap masih berlaku[23]. IMO merupakan organisasi kemaritiman yang bernaung di badan Perserikatan Bangsa-bangsa (PBB). Lloyd's Register juga telah merevisi regulasi (*provisional rules*) untuk instalasi nuklir di areal laut[23].

**Proteksi fisik.** Amerika Serikat dan Perancis telah membuat regulasi tentang proteksi fisik untuk ONPP, seperti ditunjukkan pada Gambar 7. Amerika Serikat dan Perancis membagi 4 zona untuk memproteksi ONPP dari orang-orang yang tidak bertanggung jawab dengan istilah yang berbeda beda.



Gambar 7. Sistem pengamanan PLTN lepas pantai[3,11]

Faktor-faktor utama yang mempengaruhi struktur pondasi bangunan adalah angin (kecepatan dan arah), gelombang laut (tinggi dan periode), dan arus (kecepatan dan arah) [24]. Rekayasa geoteknik merupakan kendala utama pemanfaatan lingkungan lepas pantai sebagai lokasi tapak PLTN lepas pantai. Beberapa rekayasa geoteknik yang perlu diperhatikan, sebagai berikut[25 ]:

- pengembangan permukaan tanah (*seabed*) dan investigasi tapak;
- kondisi tanah tidak umum (mis. ada material karbonat, gas);
- struktur bangunan lepas pantai akan menghadapi beban lateral (seperti momen gaya relatif terhadap berat bangunan) dan beban putar (*cyclic loading*),
- standar kode dan teknik berbeda dengan yang digunakan di darat.
- modifikasi desain selama konstruksi amat mahal (sulit diprediksi)
- usia struktur berkisar 25 – 50 tahun.

Pengembangan PLTN lepas pantai pada awalnya untuk mensuplai kebutuhan listrik di wilayah terpencil, tetapi paska kecelakaan PLTN Fukushima Daiichi di Jepang pada tahun

2011 lalu, dan keterbatasan tapak di darat, pengembangan PLTN lepas pantai semakin banyak dilakukan oleh berbagai negara. Teknologi ini dikembangkan berdasarkan teknologi konstruksi kapal laut dan/atau teknologi konstruksi perminyakan. Beberapa keuntungan PLTN lepas pantai:

- ONPP mudah dipindah pindahkan
- periode konstruksi lebih pendek dibandingkan PLTN di darat, seperti terlihat pada Gambar 6)
- dapat ditempatkan jauh dari pemukiman yang akan mengurangi dampak lingkungan darat
- meningkatkan penerimaan masyarakat
- sumber pendingin tak terbatas jika terjadi kecelakaan yang melebihi batas disain (air laut tersedia di lokasi)
- tapak sangat banyak tersedia dibanding di darat



Gambar 8. Perbandingan Waktu Konstruksi PLTN di darat dan di lepas pantai[9]

Kedalaman tapak ONPP berbeda-beda satu-sama lain sesuai dengan persyaratan yang ditentukan. Semakin dalam lokasi tapak akan semakin kecil risikonya terhadap tsunami. Dengan menggunakan persamaan shallow water dan teori kekekalan energi, ketinggian gelombang tsunami dapat diperkirakan pada kedalaman laut tertentu[6,16]. Tabel 2 menunjukkan korelasi kedalaman laut dengan ketinggian tsunami yang dihitung dengan persamaan 1. berdasar contoh gempa yang terjadi di Jepang tahun 2011 yang menyebabkan tsunami.

$$\frac{H_A}{H_B} = \left(\frac{h_B}{h_A}\right)^{1/4} \quad (1)$$

dimana: H adalah tinggi gelombang dan h adalah kedalaman laut.

Tabel 2. Korelasi kedalaman laut dengan tinggi tsunami

	<b>Pusat Gempa</b>	<b>Tapak A</b>	<b>Tapak B</b>	<b>Tapak C</b>	<b>Tapak D</b>
<b>Kedalaman Laut</b>	204 m	100 m	60 m	30 m	1 m
<b>Tinggi Tsunami</b>	6,7 m	8,6 m	9,1 m	10,8 m	25,3 m

Sebagian bangunan PLTN Apung dan PLTN GBS berada di permukaan laut, sedangkan PLTN *Submerged* berada di dasar laut dan seluruh bangunan tidak terlihat di permukaan laut. Oleh karena itu, PLTN Apung dan PLTN GBS lebih beresiko terkena dampak tsunami dibandingkan dengan PLTN *Submerged*. Tinggi bangunan penghalang/pemecah ombak atau tsunami untuk PLTN Apung harus diperhitungkan secara rinci agar dampak tsunami tidak mempengaruhi system keselamatannya. Tinggi bangunan PLTN GBS dari permukaan laut harus memperhitungkan pasang surut/naik dan ketinggian tsunami yang mungkin terjadi. Hal ini dilakukan untuk menjamin dampaka kecelakaan yang mungkin terjadi terhadap PLTN GBS.

Pertahanan berlapis (*defence in depth*) juga diterapkan dengan sistem keamanan dan proteksi. Zonasi dilakukan dengan dengan tanda-tanda yang telah dikenal dalam dunia pelayaran dan dunia penerbangan, baik dalam bentuk sonar maupun suar (lampu). Selain zonasi seperti ditunjukkan pada Gambar 7, perlu ditambah peralatan deteksi dini dan peringatan dini terhadap kapal maupun pesawat yang akan mendekati dan/atau melintas di sekitar PLTN.

Menurut IAEA, lokasi tapak PLTN tidak secara sfesifik ditetapkan di darat maupun di laut, sedangkan Peraturan Presiden Nomor 54 Tahun 2012 tentang Keselamatan dan Keamanan Instalasi Nuklir pada pasal 1 ayat 2. dimana tapak instalasi nuklir harus berada di darat (*in land*)[26,27] menyebabkan PLTN lepas pantai belum dapat diimplementasikan di Indonesia. Dari sisi teknologi, reaktor ini layak diimplementasikan karena:

- lokasi tapak sangat tersedia
- sistem keselamatan tinggi
- sistem keamanan tinggi (kemungkinan gangguan dan sabotase kecil)
- pembebasan lahan tapak lebih mudah

Analisis dengan metode kekuatan (*strength*) kelemahan (*weaknesses*), kesempatan (*opportunities*), dan ancaman (*threaats*) merupakan prasyarat untuk mengimplementasikan PLTN Lepas pantai di Indonesia.

Tabel 3. Analisis SWOT tapak ONPP

<b>Kekuatan (<i>Strength</i>)</b>	<b>Kelemahan (<i>Weaknesses</i>)</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- lokasi tapak potensial banyak tersedia</li> <li>- mudah diangkut dan dipindahkan</li> <li>- penerimaan masyarakat lebih mudah</li> <li>- sistem keselamatan lebih tinggi (<i>ultimate heat sink</i>)</li> <li>- keamanan lebih tinggi</li> <li>- biaya tapak lebih murah</li> <li>- kebutuhan pipa lebih sedikit</li> <li>- pengaruh negatip terhadap lingkungan lebih kecil</li> <li>- dekomisioning lebih mudah</li> <li>- pasokan pendingin tidak terbatas</li> <li>- waktu konstruksi lebih singkat</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- regulasi</li> <li>- SDM regulator</li> <li>- biaya jaringan mahal</li> <li>- partisipasi nasional kecil</li> <li>- sangat tergantung pada kondisi laut</li> <li>- perawatan lebih sulit</li> <li>- akses nelayan ke lokasi tapak terbatas</li> <li>- lalu lintas pelayaran terbatas</li> <li>- teknologi belum teruji</li> <li>- negara pemasok terbatas</li> <li>- kabel yang dibutuhkan lebih panjang</li> </ul>
<b>Kesempatan (<i>Opportunities</i>)</b>	<b>Ancaman (<i>Threats</i>)</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- keamanan energi lebih terjamin</li> <li>- pemerataan pasokan listrik lebih fleksibel</li> <li>- pertumbuhan industri lebih cepat</li> <li>- peningkatan kemampuan SDM Indonesia</li> <li>- penurunan emisi CO<sub>2</sub></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- kontaminasi biota laut jika terjadi kebocoran nuklir</li> <li>- kerusakan terumbu karang di lokasi tapak</li> <li>- dukungan pemerintah dan masyarakat lemah dan tak stabil</li> <li>- kompetisi harga listrik dengan pembangkit fosil</li> <li>- penolakan LSM</li> </ul>

## KESIMPULAN

Indonesia mempunyai garis pantai sepanjang 81.000 km sehingga ketersediaan tapak untuk ONPP cukup besar. Laut merupakan sumber pendingin yang tidak terbatas sehingga kecelakaan ONPP akibat kegagalan suplai pendingin dapat diminimalisir dengan sistem pasif. Regulasi tentang tapak PLTN di lepas pantai di Indonesia belum diatur sehingga perlu dilakukan revisi regulasi ketenaganukliran agar ONPP dapat diimplementasikan di kemudian hari. Kawasan pesisir diantara pantai timur pulau Sumatera, kawasan pantai utara pulau Jawa, kawasan pantai pulau Kalimantan dan kawasan pantai di antara ketiga pulau besar ini. Kelayakan tapak lepas pantai di kawasan ini perlu dilakukan lebih detil sesuai regulasi yang berlaku.

## DAFTAR PUSTAKA

1. MISSE WESTER-HERBER, Underlying Concerns In Land-Use Conflicts-The Role Of Place Identify In Risk Perception, Enviromental Science & Policy, volume 7, issue 2, April 2004, pages 109-109, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S146290110400024>, diunduh 2 November 2014
2. STEPHEN W. KIDD, Nuclear Power-Economics and Public Acceptance, Energy Strategy Reviews, Volume 1, Issue 4, May 2013, Pages 277-281, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X13000394>, diunduh 2 November 2014
3. SAHALA MARULI LUMBANRAJA, CITRA CANDRANURANI, RR. ARUM PUNI RIJANTI, Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir 2015, ISSN:2355-7524, Denpasar, 15-16 Oktober 2015
4. W.J.F. STANDRING , M. DOWDALL, I. AMUNDSEN, P. STRAND, Floating nuclear power plants: Potential implications for radioactive pollution of the northern marine environment, Marine Pollution Bulletin 58 (2009) 174–178
5. P.V. THANGAM BABU AND D.V. REDDY, Existing Methodologies in the Design And Analysis Of Offshore Floating Nuclear Power Plants, Nuclear Engineering and Design 48 (1978) 167-205
6. KIHWAN LEE, et.al, "A New Design Concept For Offshore Nuclear Power Plants With Enhancedsafety Features", Nuclear Engineering and Design 254 (2013) 129–141
7. KIHWAN LEE, An Offshore Nuclear Power Plant Mounted On Gravity-Based Structures And Its Seismic Performance, Division of Ocean Systems Engineering School of Mechanical, Aerospace and Systems Engineering KAIST [http://library.kaist.ac.kr/thesis02/2012/2012M020104378\\_S1Ver2.pdf](http://library.kaist.ac.kr/thesis02/2012/2012M020104378_S1Ver2.pdf) , diunduh 12 Jan 2015
8. JACOB MORZINSKI, JACOPO BOUNGIORNO, MIT Offshore Floating Nuclear Power Plants, <https://wikis.mit.edu/confluence/display/FLOATINGREACTOR/MIT+Offshore+Floating+Nuclear+Power+Plant>, diunduh 12 Jan 2015
9. KANG-HEON LEE, MIN-GIL KIM, JEONG IK LEE, PHILL-SEUNG LEE, Recent Advances in Ocean Nuclear Power Plants, Energies 2015, 8, 11470-11492; doi:10.3390/en81011470
10. MICK COOK, et. al., Guidance Notes for The Planning and Execution of Geophysical and Geotechnical Ground Investigations for Offshore Renewable Energy Developments, May 2014, The Society for Underwater Technology, ISBN 0 906940 54 0, ISBN 13 978 0 906940 54 9
11. J. BUONGIORNO, J. JUREWICZ, M. GOLAY, N. TODREAS, The Offshore Floating Nuclear Plant Concept, Nuclear Technology · Volume 194 · 000 –000 · MONTH 2016, <http://dx.doi.org/10.182/NT15-49>, diunduh 9 Juli 2018
12. COMMUNICATIONS DEPARTMENT OF ROSATOM, <https://www.rosatom.ru/en/press-centre/news/the-world-s-only-floating-power-unit-akademik-lomonosov-takes-the-sea/>

13. SAHALA MARULI LUMBANRAJA, Kajian Implementasi Flexblue di Indonesia, Jurnal Pengembangan Energi Nuklir, Volume 16, Nomor 2, Desember 2014
14. DCNS, "Flexblue: a Subsea Reactor Project Considerations for its Licensing", 6th INPRO Dialogue Forum, July 2013, [http://www.iaea.org/INPRO/6th\\_Dialogue\\_Forum/session-2/2-france.pdf](http://www.iaea.org/INPRO/6th_Dialogue_Forum/session-2/2-france.pdf), diunduh 22 September 2014
15. DCNS, "DCNS Dévoile Un Étonnant Concept De Centrale Nucléaire Sous-Marine", Mer et Marine 19-01-2011 <http://www.meretmarine.com/fr/content/dcms-devoile-un-etonnant-concept-de-centrale-nucleaire-sous-marine>, diunduh 24 September 2014
16. SAHALA M. LUMBANRAJA, DHARU DEWI, Kajian Pra-kelayakan PLTN SMART Lepas Pantai Jenis Struktur Berbasis Gravitasi untuk Indonesia, Jurnal Pengembangan Energi Nuklir, Vol.19, No.1 (2017) DOI: <http://dx.doi.org/10.17146/jpen.2017.19.1.3267>
17. MIN-GIL KIM, et.al., Conceptual Studies of Construction and Safety Enhancement of Ocean SMART Mounted on GBS, Nuclear Engineering and Design, Volume 278, 15 October 2014, Pages 558–572, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029549314004774>
18. WNA, Nuclear Power in China, updated July 2018, <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/china-nuclear-power.aspx>, diunduh 9 Juli 2018
19. EDLIC SATHIAMURTHY, HAROLD K. VORIS, Maps of Holocene Sea Level Transgression and Submerged Lakes on the Sunda Shelf, The Natural History Journal of Chulalongkorn University, Supplement 2: 1-43, August 2006, <https://www.fieldmuseum.org/sites/default/files/Sathiamurthy%20%20Voriss%20006%20NHJCU%20.pdf>
20. JOHN WARREN KINDT, Floating nuclear power Plants, MARINE POLICY April 1993
21. RICHARD S. ORR, CLINTON DOTSON, Offshore Nuclear Power Plants, Nuclear Engineering and Design 25 (1973) 334-349
22. KUZNETSOV V. M. et.al., Floating Nuclear Power Plants In Russia: A Threat To The Arctic, World Oceans And Non-Proliferation Treaty, Green Cross Russia, [https://www.greencross.ch/wp-content/uploads/uploads/media/gc\\_fnpp\\_book.pdf](https://www.greencross.ch/wp-content/uploads/uploads/media/gc_fnpp_book.pdf)
23. ROYAL ACADEMY OF ENGINEERING, July 2013, Future Ship Powering Options, Exploring Alternative Methods of Ship Propulsion, Prince Philip House 3 Carlton House Terrace London SW1Y 5DG, ISBN: 978-1-909327-01-6
24. STEFFEN MARX, JOACHIM GOHLMANN, BOSO SCHMIDT, OLIVER GOTHEL, Concepts for Gravity Base Foundations, Institute of Concrete Constructions, [http://rave2012.iwes.fraunhofer.de/img/pdfs/Session9/9.4\\_Marx.pdf](http://rave2012.iwes.fraunhofer.de/img/pdfs/Session9/9.4_Marx.pdf)
25. TEVA, Concrete Gravity Based Structure Coastal Labrador Natural Gas Extraction, Midterm Reports, Peter Tromans <http://www.engr.mun.ca/~sbruneau/teaching/8700project/archive/classof2008/midevax.pdf>, diunduh 12 Jan 2015
26. IAEA, Site Evaluation for Nuclear Installations, Safety Requirements Series No. NS-R-3, Vienna 2003
27. BAPETEN, Peraturan Pemerintah Nomor 54 Tahun 2012 Tentang Keselamatan dan Keamanan Instalasi Nuklir, Jakarta 2012

## SARAN

Revisi PP 54 Tahun 2012 tentang Keselamatan dan Keamanan Instalasi Nuklir pada pasal 1 ayat 2 dan Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN) Nomor 1 Tahun 2010 pasal 1 ayat 2 perlu direvisi agar lokasi tapak lebih banyak pilihan..

## UCAPAN TERIMAKASIH

Kami mengucapkan terimakasih kepada Ir. Sriyana M.T. yang telah memberikan saran-saran perbaikan pada makalah ini.

## PENGARUH KOMPOSISI ISOTOP DAN DENSITAS BAHAN BAKAR TERHADAP PARAMETER KRITIKALITAS DAN KINETIK PWR AP1000

Tagor Malem Sembiring<sup>1</sup>, Surian Pinem<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Pusat Kajian Sistem Energi Nuklir (PKSEN-BATAN), Jalan Kuningan Barat, Mampang Prapatan, Jakarta 12710

<sup>2</sup> Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir, Kawasan Puspiptek Serpong, Tangerang Selatan 15310

email: tagorms@batan.go.id

### ABSTRAK

**PENGARUH KOMPOSISI ISOTOP DAN DENSITAS BAHAN BAKAR TERHADAP PARAMETER KRITIKALITAS DAN KINETIK PWR AP1000.** Makalah ini menyajikan penelitian pengaruh komposisi isotop dan densitas bahan bakar pada parameter kritikalitas ( $k_{\text{eff}}$ ) dan parameter kinetik di teras PWR AP1000. Bahan bakar PWR pada saat ini banyak difabrikasi dari hasil *downblending* uranium *weapon-grade*, sehingga keberadaan nuklida U-234 dan U-236 perlu dianalisis. Kajian U.S DOE menunjukkan jika massa  $\text{UO}_2$  per batang bahan bakar dipakai sebagai acuan, nilai densitas  $\text{UO}_2$  berbeda dengan yang dinyatakan dalam desain. Seluruh komposisi nuklida dihitung berdasarkan prosentase berat untuk tiap densitas bahan bakar. Perhitungan teras dilakukan dengan MCNP6.1 dengan model geometri 3-dimensi XYZ yang detail. Teras AP1000 yang dipilih adalah teras pertama di awal siklus dengan kondisi dengan (1574 ppm) dan tanpa boron. Analisis dilakukan dengan membandingkan dengan kondisi acuan, tanpa nuklida U-234 dan U-236 serta densitas  $10,467 \text{ g/cm}^3$ . Hasil perhitungan menunjukkan bahwa efek keberadaan U-234 dan U-236 dan densitas  $\text{UO}_2$  memberikan dampak yang signifikan pada  $k_{\text{eff}}$  teras dengan perubahan reaktivitas maksimum sebesar 369,9 pcm. Tidak ditemukan dampak yang signifikan pada parameter kinetik akibat perubahan komposisi dan densitas bahan bakar untuk reaktor AP1000.

Kata kunci: PWR AP-1000, MCNP6.1, parameter kinetik, kritikalitas,  $\text{UO}_2$

### ABSTRACT

**INFLUENCE OF FUEL ISOTOPES COMPOSITION AND DENSITY ON THE CRITICALITY AND KINETIC PARAMETERS OF THE AP1000 PWR.** This paper showed a research work of the influence of the fuel isotopes and density on the criticality ( $k_{\text{eff}}$ ) and kinetics parameters of the AP1000 PWR. The PWR fuel is fabricated by downblending of the weapon-grade uranium, currently, so the presence of U-234 dan U236 nuclides should be analyzed. The review from the US-DOE showed that if we use the mass of  $\text{UO}_2$  per fuel rod length data as the reference, the density of  $\text{UO}_2$  is difference with the design value. All nuclide compositions were determined based on weight percentage of each fuel density. The core calculations were carried out using MCNP6.1 code with a detail 3-dimension XYZ geometry model. The first core in the beginning of cycle with (1574 ppm) or without boron of the AP1000 is chosen. The analysis was carried out by comparing the core calculation results with the reference condition, without 2 nuclides and density of  $10.467 \text{ g/cm}^3$ . The calculation results showed that the effects of the presence of U-234 and U-236 nuclides and the density of  $\text{UO}_2$  have a significant impact on the  $k_{\text{eff}}$  with the maximum reactivity of 369.9 pcm. There were no significant impacts on kinetic parameters due to changes in the composition and density of fuel for the AP1000 reactor.

Keyword: AP1000 PWR, MCNP6.1, kinetic parameter, criticality,  $\text{UO}_2$

### PENDAHULUAN

Reaktor PWR AP1000 desain Westinghouse merupakan generasi baru reaktor daya PWR (*Pressurized Water Reactor*), *generation III+*, kelas 1000 MW (elektrik). Penyederhanaan dalam desain dan operasi mengurangi biaya (*cost*) pembangunannya, disamping peningkatan sistem keselamatan pasif, sehingga desain ini memiliki kelebihan dibanding generasi PWR sebelumnya [1]. Keunggulan keselamatan pasif di reaktor AP1000 telah membuat banyak negara tertarik untuk membangunnya [2]. Reaktor PWR AP1000 pertama telah beroperasi komersil di Unit-1 Sanmen (Tiongkok) pada tanggal 30 Juni 2018.

Keunggulan PLTN jenis PWR AP1000 perlu dikaji dan dianalisis sebelum menentukan pilihan dari beberapa jenis PWR lanjut (*advance*) yang telah didesain, seperti PWR EPR, yang juga telah beroperasi komersil di Tiongkok [2].

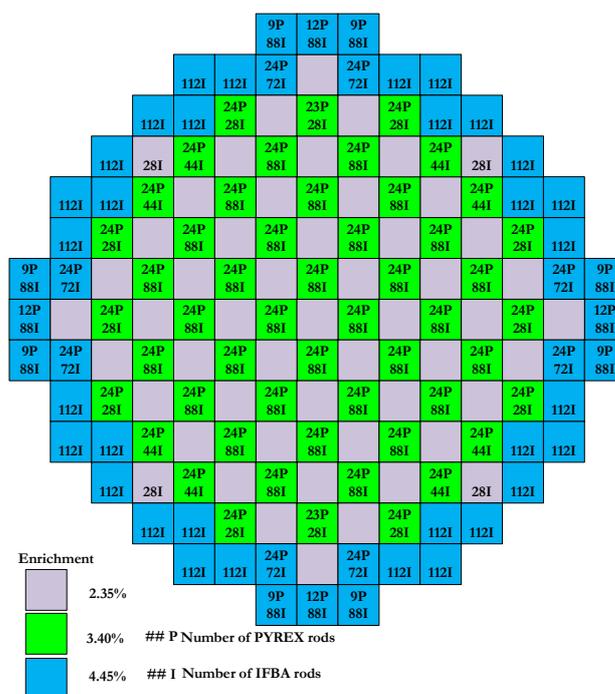
Kajian US-DOE (*Departement of Energy*) menunjukkan bahwa komposisi nuklida dan densitas bahan bakar mempengaruhi parameter kritikalitas teras PWR [3]. Saat ini bahan bakar reaktor daya difabrikasi dari hasil *downblending* uranium *weapon-grade*, sehingga komposisi nuklida U-234 dan U-236 terdapat dalam bahan bakar segarnya. Kehadiran nuklida U-234 dan U-236 memberi kontribusi reaktivitas sebesar 80 pcm [3]. US-DOE menemukan bahwa densitas dari hasil pernyataan desain dan jika dihitung dari data massa  $UO_2$  per perangkat bahan bakar akan terdapat perbedaan sebesar 1%. Meskipun kecil tetapi kontribusinya terhadap reaktivitas juga perlu dihitung.

Makalah ini menyajikan perubahan parameter kritikalitas (reaktivitas teras) dan kinetika reaktor AP1000 akibat perubahan komposisi nuklida dan densitas bahan bakar. Diasumsikan hal yang sama dengan kajian US-DOE akan muncul dalam desain reaktor AP1000. Kedua parameter tersebut sangat penting dalam pengendalian reaktor, yaitu jumlah konsentrasi boron yang diperlukan untuk mencapai kondisi kritis dan jumlah batang kendali. Tujuan penelitian ini adalah untuk menentukan pengaruh perubahan tersebut dalam parameter kritikalitas dan kinetika reaktor AP1000.

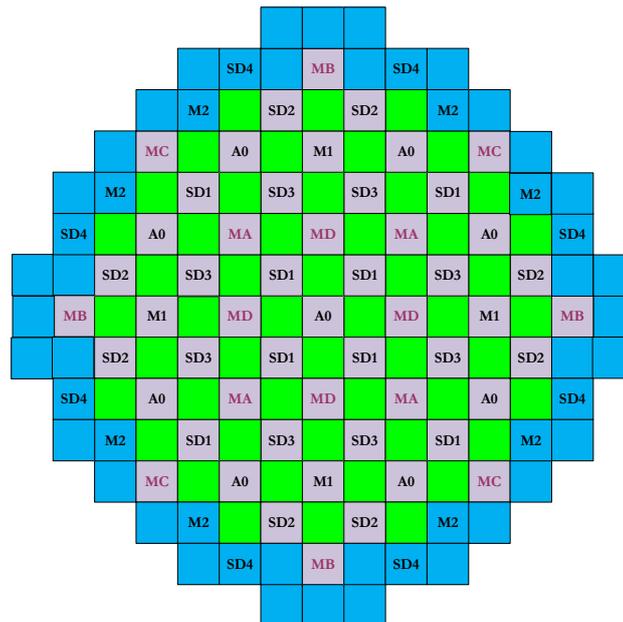
Analisis dilakukan dengan paket program MCNP6.1 dengan data nuklir ENDF/B-VII.1 [4,5]. Validasi MCNP yang akurat dalam perhitungan kritikalitas dan parameter kinetik teras PWR telah ditunjukkan dalam penelitian sebelumnya [6-10]. Akurasi data nuklir ENDF/B-VII.1 juga telah ditunjukkan dalam kajian untuk reaktor PWR [5,7,11]. Kondisi teras AP1000 yang dipilih untuk studi ini adalah teras pertama di awal siklus. Kondisi saat tanpa boron dengan boron kritis (*designed value*) dipakai untuk melihat besarnya dampak perubahan parameter bahan bakar tersebut. Data desain AP1000 yang dipakai dalam penelitian ini diambil dari *AP1000 Design Control Document Rev. 19* [12].

### DESKRIPSI SINGKAT PWR AP1000

Daya termal sebesar 3400 MW reaktor AP1000 dibangkitkan dari 157 perangkat bahan bakar yang tersusun seperti Gambar 1 dan 2 [6,12]. Gambar 1 menyajikan komposisi perangkat bahan bakar yang menggunakan PYREX dan IFBA untuk mengendalikan reaktivitas lebih teras di awal siklus. Jenis dan pengelompokan batang kendali di teras awal disajikan di Gambar 2.



Gambar 1. Konfigurasi teras pertama AP1000 [6,12]



Bank

MA	MSHIM Control Gray Bank	AO	AO Control Bank
MB	MSHIM Control Gray Bank	SD1	Shutdown Bank 1
MC	MSHIM Control Gray Bank	SD2	Shutdown Bank 2
MD	MSHIM Control Gray Bank	SD3	Shutdown Bank 3
M1	MSHIM Control Black Bank	SD4	Shutdown Bank 4
M2	MSHIM Control Black Bank		

Gambar 2. Konfigurasi teras pertama AP1000 dengan batang kendali [6,12]

Bahan bakar AP1000 menggunakan 3 jenis pengkayaan UO<sub>2</sub> yaitu 2,35 %, 3,4% dan 4,45%. Bahan bakar, PYREX dan IFBA disusun dalam perangkat bahan bakar 17 x 17. Tabel 1 menyajikan beberapa data desain AP1000 yang digunakan dalam penelitian ini [6,12]. Data detail dapat dilihat dalam Pustaka [12].

Tabel 1. Desain reaktor AP1000

Parameter	Nilai
<b>Daya reaktor:</b>	
Daya termal, MW	3400
Daya elektrik, MW	1117
Panas yang dibangkitkan di bahan bakar, %	97,4
<b>Teras aktif:</b>	
Tinggi bahan bakar aktif di teras pertama, cm	426,7
Diameter ekuivalen, cm	304
<b>Perangkat bahan bakar:</b>	
Susunan 1 (satu) perangkat	17x17
Jumlah perangkat dalam satu teras	157
Material bahan bakar	UO <sub>2</sub> ( <i>sintered</i> )
Pengkayaan U-235,w%	2,35, 3,40 dan 4,45
Jumlah batang (rod) bahan bakar	264
Jumlah tabung pengarah/ <i>instrument guide thimbles</i>	24/1
<b>Batang bahan bakar:</b>	
Jumlah <i>di teras</i>	41.448
Diameter luar , cm	0,94996

Diameter celah, cm	0,01651
Tebal kelongsong, cm	0.05715
Panjang batang bahan bakar aktif, cm	426,72

**Pelet bahan bakar::**

Material	UO <sub>2</sub>
Densitas (% teoritis) (nominal)	95,5%
Diameter, cm	0,81915
Massa UO <sub>2</sub> per batang bahan bakar, g/cm	5,4467

**METODOLOGI**

Perhitungan parameter kritikalitas teras AP1000 untuk pengaruh komposisi nuklida dan densitas bahan bakar dilakukan dengan:

1. Teras AP1000 yang dipilih adalah teras pertama dengan 3 jenis pengkayaan (Gambar 1) pada kondisi CZP (*cold zero power*), dingin (293 K) dan daya rendah (*zero power*).
2. Teras AP1000 dimodelkan secara detail dalam 3-dimensi XYZ seperti dilakukan dalam penelitian sebelumnya [6].
3. Perhitungan komposisi nuklida (isotop) penyusun bahan bakar disusun seperti Tabel 2. Nilai *W* dihitung untuk tiga jenis pengkayaan, 2,35 w/o, 3,4 w/o dan 4,45 w/o.

Tabel 2. Persamaan nuklida pengkayaan rendah [3]

Isotop	Persamaan
U-234	$0,007731 \times W^{1,0837}$
U-235	<i>W</i>
U-236	$0,0046 \times W$
U-238	sisanya

Catatan : *W* = % berat U-235

4. Perhitungan densitas UO<sub>2</sub> dilakukan dengan massa UO<sub>2</sub> per batang bahan bakar di Tabel 1, yaitu 4,4467 g/cm. Jika dihitung volume total batang bahan bakar, dengan panjang 426,72 cm dan jari-jari 0,409575 cm, maka densitas UO<sub>2</sub> menjadi 10,297 g/cm<sup>3</sup>. Nilai ini 1,62% lebih kecil dibanding nilai berdasarkan 95,5% teotitis, 10,467 g/cm<sup>3</sup>.
5. Perhitungan kritikalitas, *k<sub>eff</sub>*, dengan MCNP6.1 dilakukan untuk pengaruh komposisi U-234 dan U-236 dibandingkan dengan tanpa 2 nuklida ini. Acuan nilai *k<sub>eff</sub>* yang tanpa 2 nuklida, U234 dan U-236, diambil dari penelitian Kuntoro, I. dkk [11].
6. Perhitungan *k<sub>eff</sub>* akibat perubahan denistas UO<sub>2</sub> dilakukan untuk densitas 10,297 g/cm<sup>3</sup>. Hasil perhitungan dibandingkan dengan densitas 10,467 g/cm<sup>3</sup> [11]
7. Langkah 5 dan 6 dilakukan untuk 2 kondisi boron, yaitu tanpa boron (0 ppm) dan dengan boron (1574 ppm). Kondisi dengan boron, 1574 ppm, diambil dari data desain AP1000 sebagai konsentrasi boron kritis untuk CZP pada awal siklus [12]. Khusus, untuk perhitungan parameter kinetik, teras hanya pada kondisi dengan boron.

Perhitungan kritikalitas, *k<sub>eff</sub>*, teras AP1000 dengan MCNP6.1 dilakukan dengan jumlah neutron sebanyak 100.000 (10<sup>5</sup>) per siklus. Sejumlah 100 siklus dilompati sebelum perhitungan *k<sub>eff</sub>* dimulai dari total 600 siklus yang digunakan. Sumber neutron diatur posisinya dengan kartu (*card*) *ksrc* yang terdistribusi ke arah aksial dan radial. Jumlah posisi sumber neutron adalah 340 titik. Parameter kinetik, yaitu parameter neutron kasip, dihitung dengan kartu KOPTS. Hamburan neutron termal S(α,β) untuk H<sub>2</sub>O pada temperatur 293 K dipilih dalam perhitungan ini. Khusus untuk perhitungan parameter kinetik, parameter yang dihitung adalah *β<sub>eff</sub>* dan *ℓ* (μs)

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

Hasil perhitungan *k<sub>eff</sub>* akibat perubahan komposisi nuklida dan densitas bahan bakar akan disajikan terlebih dahulu. Tabel 3 menyajikan efek nuklida U-234 dan U-236 pada nilai *k<sub>eff</sub>* teras AP1000 pada kondisi tanpa boron (0 ppm) dan dengan boron (1574 ppm). Tampak jelas bahwa efek nuklida U-234 dan U-236 dapat mencapai 216,4 pcm pada saat dengan boron. Efeknya berkurang pada saat tanpa boron yaitu 178, 6 pcm. Nilai perubahan

sebesar 178,6 pcm dan 216 pcm ini setara dengan nilai 1 grup batang kendali MSHIM Gray (*all bank*), MC (Gambar 2), 139 pcm (awal siklus) dan 218 pcm (akhir siklus) untuk kondisi HZP [12]. Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh keberadaan 2 nuklida U-234 dan U-236 cukup signifikan dalam kritikalitas. Jika dilihat dari konsentrasi boron, perbedaan 178,6 pcm dan 216,4 pcm masing-masing setara dengan 35,72 ppm dan 43,28 ppm (dengan asumsi koefisien boron minimum 5 pcm/ppm) [12]. Besarnya pengaruh konsentrasi boron sebesar 43,28 ppm adalah 60% dari selisih konsentrasi boron dari kondisi *cold* ke *hot* [12].

Tabel 3 juga menunjukkan bahwa saat ada boron, kehadiran nuklida U-234 dan U-236 memberikan efek 37,8 pcm lebih besar dibanding bahan bakar yang tidak mengandung 2 nuklida tersebut. Ini menunjukkan interaksi neutronik dengan adanya boron lebih sensitif terhadap perubahan yang terjadi di bahan bakar. Hal ini juga ditunjukkan pada Tabel 4, perubahan densitas 1,62% dapat menyebabkan perbedaan kritikalitas sebesar 264 pcm diantara 2 kondisi densitas tersebut.

Efek perubahan densitas untuk kondisi teras tanpa dan dengan boron masing-masing adalah 105,9 pcm dan 369,9 pcm. Seperti dinyatakan di atas, nilai ini melebihi dari nilai 1 grup batang kendali MSHIM Gray (*all bank*) yang terbesar, MD (Gambar 2), 312 pcm (awal siklus) untuk kondisi HZP [12]. Dengan demikian perubahan  $k_{eff}$  AP1000 akibat densitas  $UO_2$ ,  $\Delta\rho_{UO_2}$ , berada dalam rentang 622,94 pcm/g/cm<sup>3</sup> – 2175,88 pcm/g/cm<sup>3</sup>.

Tabel 3. Efek nuklida U-234 dan U-236 pada  $k_{eff}$  teras AP1000

Konsentrasi boron, ppm	Tanpa U-234 dan U-236	Dengan U-234 dan U-236	$\Delta\rho$ , pcm
$k_{eff}$			
0	1,21015±0,00010	1,20754±0,00010	178,6
1574	0,98138±0,00010	0,97930±0,00009	216,4

Tabel 4. Efek densitas  $UO_2$  pada  $k_{eff}$  teras AP1000

Konsentrasi boron, ppm	10,467 g/cm <sup>3</sup>	10,297 g/cm <sup>3</sup>	$\Delta\rho$ , pcm
$k_{eff}$			
0	1,21015±0,00010	1,20860±0,00013	105,9
1574	0,98138±0,00010	0,97783±0,00010	369,9

Tabel 5 menyajikan hasil perhitungan parameter kinetik AP1000,  $\beta_{eff}$  dan  $\ell$  ( $\mu$ s), untuk efek hadirnya nuklida U-234 dan U-236 serta perubahan densitas  $UO_2$ . Hal yang sama pada parameter kritikalitas, parameter  $\beta_{eff}$  lebih berpengaruh pada perubahan densitas dibanding perubahan komposisi nuklida. Efek perubahan densitas sebesar 1,60% sedangkan efek kehadiran nuklida sebesar 0,67%. Hal ini dikarenakan pada kejadian perubahan densitas, maka komposisi U-235 dan U-238 berubah sehingga terjadi pergeseran fluks neutron lebih ke termal sehingga menaikkan nilai  $\beta_{eff}$ .

Tabel 6 menunjukkan nilai  $\ell$  akan naik 1,91% dengan hadirnya nuklida U-234 dan U-236. Kenaikan nilai  $\ell$  akan lebih tinggi lagi dengan berurangnya densitas  $UO_2$  yaitu 3,38%. Meskipun demikian dalam aspek kendali perubahan sebesar ini tidak memberikan dampak pada kendali neutron. Seperti disinggung sebelumnya, penyebab ini berkaitan dengan perubahan fluks thermal neutron akibat perubahan densitas memiliki pengaruh yang lebih besar.

Table 5. Hasil perhitungan  $\beta_{eff}$  and  $\ell$  untuk AP1000

Parameter	Desain	Tanpa	Dengan
		U-234 dan U236	U-234 dan U236
$\beta_{eff}$	0,0075	0,00695±0,00013 (-7,33%) <sup>a</sup>	0,00690±0,00013 (-8,00%) <sup>a</sup>
$\ell$ , $\mu$ s	19.8	19.53±0.04 (-1,36%) <sup>a</sup>	19,91±0,04 (0,55%) <sup>a</sup>
	<b>Desain</b>	<b>Densitas</b>	<b>Densitas</b>

		10,467 g/cm <sup>3</sup>	10,297 g/cm <sup>3</sup>
$\beta_{\text{eff}}$	0.0075	0,00695±0,00013 (-7,33%) <sup>a</sup>	0,00707±0.00014 (-5,73%) <sup>a</sup>
$\ell$ , $\mu\text{s}$	19.8	19,53±0,04 (-1,36%) <sup>a</sup>	20,20±0,04 (2,02%) <sup>a</sup>

Catatan : <sup>a</sup> Perbedaan relatif dengan nilai desain

## KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa parameter kritikalitas sangat sensitif dengan perubahan komposisi nuklida penyusun bahan bakar dan densitas bahan bakar dibanding parameter kinetik. Perubahan reaktivitas maksimum akibat perubahan densitas UO<sub>2</sub> dan perubahan komposisi nuklida masing-masing sebesar 369,9 pcm dan 216,4 pcm. Harga perubahan reaktivitas per perubahan densitas maksimum sebesar 2175,88 pcm/gcm<sup>3</sup>. Perubahan pada parameter kinetik,  $\beta_{\text{eff}}$  dan  $\ell$ , akibat hadirnya nuklida U-234 dan U-236 serta perubahan densitas tidak signifikan.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini dilakukan di PKSEN-BATAN dalam kegiatan DIPA PKSEN Tahun Anggaran 2018.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1]. SCHULZ T.L., "Westinghouse AP1000 Advanced Passive Plant", Nucl Eng Des. Vol. 236, pp. 1547-57 (2006).
- [2]. CUMMINS, W.E, MATZIE, R., "Design Evolution of PWRs: Shippingport to Generation III+", Prog Nucl Energy, Vol. 102, pp 9-37 (2018).
- [3]. GODFREY, A.T., "VERA core physics benchmark progression problem specifications" (2014)
- [4]. GOORLEY, T., JAMES, M. , BOOTH, T. , BROWN, F., BULL, J. , COX, L.J. , et al. "Features of MCNP6", Ann Nucl Energy, Vol 87, pp 772-83 (2016)
- [5]. KAHLER, A.C., MACFARLANE, R.E., MOSTELLER, R.D., KIEDROWSKI, B.C., FRANKLE, S.C., CHADWICK, M.B., et al, "ENDF / B-VII . 1 Neutron Cross Section Data Testing with Critical Assembly Benchmarks and Reactor Experiments", Nucl Data Sheets, Vol. 112, pp. 2997–3036 (2011).
- [6]. SEMBIRING, T.M., Analysis of the 3-Dimensional Core Model for Evaluation of Criticality Parameters of the Advanced PWR 100 MW Class", Tri Dasa Mega, Vol 13, pp 78-95 (2011).
- [7]. SEMBIRING, T.M., SUSILO, J. , PINEM., S., "Evaluation of the AP1000 Delayed Neutron Parameters using MCNP6". J Phys Conf Ser. 962, 012030 (2018) .
- [8]. BÉCARES, V., PÉREZ-MARTÍN, S., VÁZQUEZ-ANTOLÍN, M., VILLAMARÍN, D, MARTÍN-FUERTES, F., GONZÁLEZ-ROMERO, E.M., et al., "Review and Comparison of Effective Delayed Neutron Fraction Calculation Methods with Monte Carlo Codes". Ann Nucl Energy, Vol 65, pp 402- 10 (2014).
- [9]. PERRET, G., BLAISE, P., MESSAOUDI, N., GESLOT, B., WAGEMANS, J., BAETEN, P, et al., "Validation of Monte-Carlo Methods for Generation Time and Delayed Neutron Fraction Predictions", Ann Nucl Energy, Vol 97, pp 165-70 (2016)..
- [10]. VASILIEV, A., FERROUKHI, H., PECCHIA, M., PAUTZ, A, "Localized Neutron Flux Assessment and Verification Studies using MCNPX PWR Full Core Model", Ann Nucl Energy, Vol 92, pp 317-32 (2016).
- [11]. KUNTORO, I., SEMBIRING, T.M., SUSILO, J., SUNARYO, G.R., "Effects of the Application of the New Nuclear Data Library ENDF/B to the Criticality Analysis of AP1000 ", J Phys Conf Ser. 962, 012059 (2018)
- [12]. WESTINGHOUSE, "AP1000 Design Control Document. AP1000 Design Control Document", (2009).

## PERENCANAAN AWAL DESAIN PONDASI GEDUNG TURBIN PADA REAKTOR DAYA EKPERIMENTAL

Eko Rudi Iswanto<sup>1)</sup> and Abdul Hafid<sup>2)</sup>

<sup>1</sup> Pusat Kajian Sistem Energi Nuklir - BATAN

<sup>2</sup> Pusat Teknologi Keselamatan Reaktor Nuklir - BATAN

email: ekorudi@batan.go.id

### ABSTRAK

**PERENCANAAN AWAL DESAIN PONDASI GEDUNG TURBIN PADA REAKTOR DAYA EKSPERIMENTAL.** Gedung turbin adalah salah satu bangunan Reaktor Daya Eksperimental dari material baja yang berfungsi untuk menampung sejumlah komponen penting suatu pembangkit listrik seperti turbin, generator, kondensor dan peralatan lain sebagai konversi energi panas. Maka dari itu, pembebanan dalam gedung turbin khususnya beban mati, dihitung dengan mempertimbangkan berat sendiri yang berasal dari material baja ditambah dengan semua berat komponen yang ada. Pembebanan ini akan diteruskan dari struktur atas ke pondasi. Pondasi merupakan bagian bawah dari struktur yang menerima dan meneruskan seluruh beban yang bekerja pada suatu struktur dengan harapan bahwa bangunan dalam kondisi aman. Adapun tujuan dari studi ini adalah menentukan dan mendesain jenis pondasi yang selain dapat menahan beban namun juga dapat meredam getaran mesin. Penelitian ini dilakukan dengan mengumpulkan data terkait struktur dan tanah kemudian dilakukan pemodelan dan analisis struktur atas dengan bantuan *software* SAP2000. Dari hasil penelitian menunjukkan bahwa tipe pondasi tiang *bored pile* dengan diameter 1,00 m dan panjang tiang 7 m dapat menjadi pilihan pondasi gedung turbin mengingat daya dukung yang dihasilkan adalah 150,72 ton lebih besar dari nilai reaksi atas beban yang bekerja yaitu 146 ton.

Keyword: gedung turbin, beban mati, SAP2000

### ABSTRACT

**PRELIMINARY DESIGN FOUNDATION OF TURBINE BUILDING, EXPERIMENTAL POWER REACTOR.** Turbine building is one of the buildings of Experimental Power Reactor made from steel which functions to accommodate all important component such as turbines, generators, condensers and other equipment as heat energy conversion. Therefore, loading in the turbine building, especially dead load, is calculated by considering its own weight derived from material and also the weight of all components as mentioned above. The loads will be transferred from the upper structure to the foundation. Foundation is the bottom part of the structure that receives and supports all loads that work on a structure in order to make the building is in a safe condition. The purpose of this study is to determine and design the types of foundations which are able to withstand loads and able to reduce engine vibration. This research was carried out by collecting data related to structure and soil then modeling and analyzing the upper structure with SAP2000 software. The result of the study shows that the bored pile with 1,00 m diameter and 7 m length is suitable as foundation of turbine building. It has bearing capacity approximately 150,72 tons greater than axial forces due to loading systems which is 146 tons.

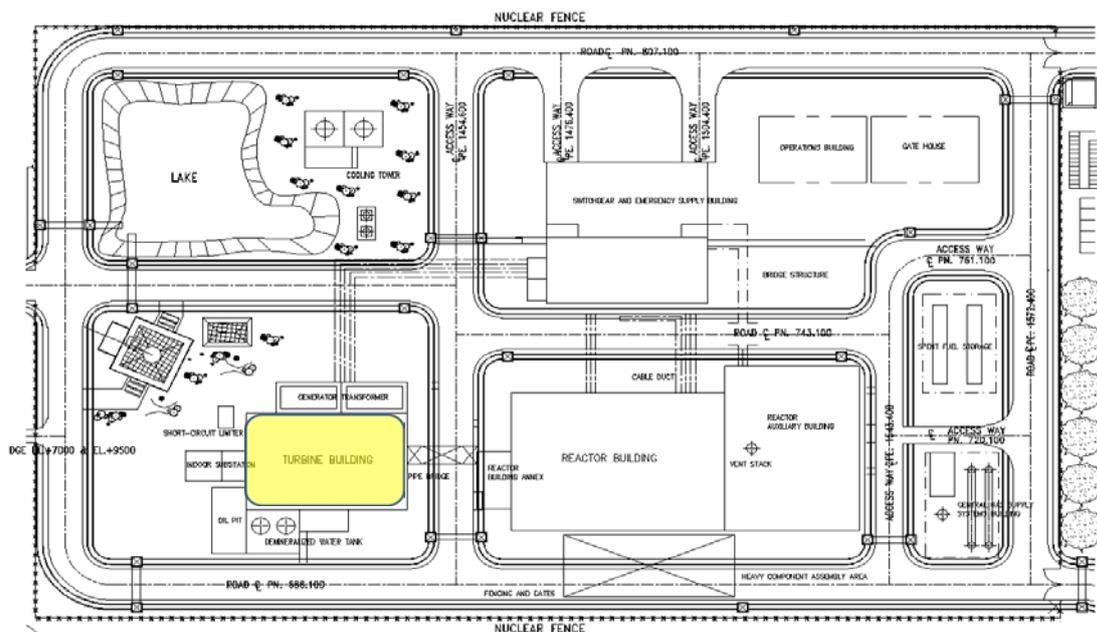
Keyword: turbine building, dead load, SAP2000

### PENDAHULUAN

Gedung turbin adalah salah satu bangunan Reaktor Daya Eksperimental (RDE) yang berfungsi untuk menampung sejumlah komponen penting suatu pembangkit listrik seperti turbin, generator, kondensor dan peralatan lain sebagai konversi energi panas. Gambar 1 mengilustrasikan tata letak RDE secara keseluruhan dan dapat dilihat pula dimana posisi gedung turbin. Termasuk kedalam jenis struktur pada umumnya, gedung turbin terdiri dari dua bagian yaitu struktur atas dan struktur bawah. Struktur atas terdiri dari bangunan turbin yang sebagian besar tersusun dari material baja dan alat angkut atau *crane* berkapasitas

sekitar 20 ton. Fungsi dari *crane* adalah sebagai sarana bantu baik pada saat perakitan, operasi, perawatan hingga dismantling unit turbin dan komponen lainnya. Sedangkan struktur bawah berupa pondasi yang berfungsi menerima dan meneruskan seluruh beban dalam hal ini beban mati, beban hidup, beban angin dan beban gempa yang bekerja pada struktur atas sehingga diharapkan bangunan dalam kondisi aman [1].

Laporan evaluasi tapak RDE menyebutkan perlu adanya evaluasi terhadap penggunaan beberapa jenis pondasi untuk gedung turbin mulai dari pondasi dangkal hingga penggunaan pondasi tiang. Apabila hasil evaluasi menggambarkan bahwa pondasi dangkal tidak mampu memberikan kinerja yang diharapkan maka penggunaan pondasi tiang dapat dijadikan pilihan yang tepat. Hal ini sejalan dengan beban berat dari struktur atas ditambah adanya beban dinamis berupa getaran mesin dari komponen yang ada [2,3].



Gambar 1. Tata letak RDE [4]

## TINJAUAN PUSTAKA

Gedung turbin yang merupakan struktur atas didesain dan dimodelkan kemudian dianalisis sehingga diperoleh gaya-gaya yang bekerja guna mengetahui lebih lanjut jumlah kebutuhan pondasi [3]. Adapun pembebanan yang dipertimbangkan adalah beban mati, beban hidup, dan beban gempa. Beban mati yang dimaksud adalah berat sendiri yang berasal dari material baja ditambah dengan semua berat komponen yang ada. Lain halnya dengan beban hidup yang didefinisikan sebagai beban yang terjadi akibat penggunaan gedung turbin, beban gempa adalah beban yang berasal dari gerakan tanah dan dikombinasikan dengansifat dinamis dari gedung turbin. Perhitungan beban gempa dilakukan dengan mengikuti peraturan SNI 1726-2012 yaitu tentang tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung. Beban ini akan disalurkan ke pondasi maka dari itu kekuatan pondasi harus mempertimbangkan besarnya beban dari gedung turbin dengan kemampuan daya dukung tanah.

## Tipe Pondasi

Banyak faktor yang mempengaruhi pemilihan jenis pondasi yang akan digunakan dalam suatu bangunan [5,6]. Diantaranya adalah keadaan tanah dasar, besarnya beban yang bekerja, dan termasuk juga biaya konstruksi. Semua faktor tersebut menjadi pertimbangan namun tetap berpegang pada prinsip bahwa tipe pondasi yang dipilih mampu mendukung beban gedung turbin tanpa mengalami keruntuhan geser dan penurunan pondasi yang terjadi dalam batas yang diizinkan. Terdapat dua jenis pondasi yaitu pondasi dangkal dan pondasi dalam. Jenis pondasi dalam pada umumnya mempunyai kedalaman

pondasi yang lebih kecil dari pada lebar pondasi. Struktur gedung sederhana, gedung sekolahan dan fasilitas umum lainnya biasanya menggunakan tipe pondasi dangkal. Beberapa macam pondasi dangkal seperti pondasi tapak setempat (*individual footing*), pondasi tapak gabungan (*combine footing*), pondasi tapak lajur (*strip footing*) dan pondasi lantai (*raft foundation*). Sedangkan pemilihan jenis pondasi dalam biasanya diambil ketika tanah dasar sebagai tempat perletakan pondasi tidak mempunyai daya dukung yang cukup untuk menahan beban yang bekerja atau dapat dikatakan juga bahwa tanah dasar berada jauh dibawah permukaan tanah. Sebagai contoh dari jenis pondasi dalam adalah pondasi tiang pancang (*pile foundation*) baik *driven pile* ataupun *bored pile*, pondasi sumuran dan pondasi kaison. Berdasarkan bahannya, pondasi tiang dibedakan menjadi pondasi tiang baja, tiang beton, tiang kayu dan tiang komposit sebagaimana dapat dilihat pada Tabel 1.

Hasil evaluasi tapak menyebutkan bahwa klasifikasi tapak RDE termasuk kedalam Tapak Tipe 3 atau Tapak Tanah Sedang dengan nilai kecepatan gelombang geser ( $V_s$ ) untuk kedalaman 30 m adalah 268 m/s dan nilai  $N_{SPT}$  rata-rata 40.6. Lebih lanjut bahwa dari hasil ini jenis pondasi yang dapat dijadikan pilihan adalah pondasi tiang (*bored pile*).

Tabel 1. Pondasi tiang berdasarkan bahannya [7]

No.	Jenis Pondasi	Panjang (m)	Beban (ton)	Kelebihan	Kekurangan
1.	Tiang Baja	15-60	30-120	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kapasitas tinggi</li> <li>- Mudah dipotong dan disambung</li> <li>- Tahan tekanan besar saat dipancang</li> <li>- Dapat menembus lapisan tanah keras</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Relatif mahal</li> <li>- Menimbulkan kebisingan saat pemancangan</li> <li>- Korosif</li> </ul>
2.	Tiang Beton <i>precast</i> (tiang pancang)	10-60	35-350	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kapasitas tinggi</li> <li>- Mudah dipotong dan disambung</li> <li>- Tahan tekanan besar saat dipancang</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Jika akan dipotong sulit menentukantiti k potong yang tepat</li> <li>- Biaya awal tinggi</li> </ul>
3.	Tiang Beton <i>cast in-situ</i> (tiang bor)/ <i>bored pile</i>				
	a. dengan casing	5-40	20-80	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Relatif murah</li> <li>- Mudah disambung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Susah dipotong setelah <i>concreting</i></li> <li>- <i>Casing</i> tipis mudah rusak saat pemancangan</li> </ul>
	b. tanpa casing	5-40	30-70	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Biaya reaktif lebih murah</li> <li>- Dapat diselesaikan pada elevasi berapapun</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Void</i> bisa terjadi</li> <li>- Sukar dilakukan pemotongan setelah <i>concreting</i></li> </ul>

### Analisis Daya Dukung Pondasi

Berdasarkan hasil pengujian sondir, kapasitas daya dukung ultimate pondasi *bored pile* dihitung dengan menggunakan metode Aoki dan De Alencar yaitu dengan menjumlahkan kapasitas daya dukung ujung *bored pile* dengan kapasitas daya dukung selimut *bored pile* [8]. Sebagaimana terlihat pada rumus berikut:

$$Q_u = Q_p + Q_s \quad (1)$$

dimana:

$Q_u$  adalah kapasitas daya dukung ultimate pondasi *bored pile* (ton)

$Q_p$  adalah kapasitas daya dukung ujung *bored pile* (ton)

$Q_s$  adalah kapasitas daya dukung selimut *bored pile* (ton)

### Kapasitas Daya Dukung Pondasi *Bored Pile* dari hasil *Cone Penetration Test (CPT) / Sondir*

Kapasitas daya dukung ujung *bored pile* ( $Q_p$ ) berdasarkan hasil CPT merupakan perkalian antara tahanan ujung persatuan luas ( $q_b$ ) dengan luas penampang *bored pile* ( $A_p$ ) [9, 10]. Lebih lanjut dijelaskan bahwa nilai  $q_b$  adalah perlawanan konus rata-rata 1,5D diatas ujung tiang dan 1,5D dibawah ujung tiang ( $q_{ca \text{ base}}$ ) dibagi dengan faktor empirik ( $F_b$ ) yang nilainya tergantung pada tipe tiang dan dapat dilihat pada Tabel 2. Adapun rumus dari keduanya adalah sebagai berikut:

$$Q_p = q_b \times A_p \quad (2)$$

$$q_b = \frac{q_{ca \text{ (base)}}}{F_b} \quad (3)$$

Sedangkan kapasitas daya dukung selimut *bored pile* dihitung dengan rumus berikut:

$$Q_s = f \times A_s \quad (2)$$

$$f = \frac{q_{c \text{ (side)}} \times \alpha_s}{F_s} \quad (3)$$

dimana:

$f$  adalah tahanan kulit persatuan luas

$A_s$  adalah luas selimut *bored pile* ( $m^2$ )

$q_{c \text{ (side)}}$  adalah perlawanan konus rata-rata pada masing-masing lapisan sepanjang tiang

$\alpha_s$  adalah faktor empirik untuk tiap jenis tanah (%) seperti dapat dilihat pada Tabel 3.

$F_s$  adalah faktor empirik tahanan ujung tiang yang tergantung pada tipe tiang seperti dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Faktor empirik  $F_b$  dan  $F_s$  untuk tiap jenis tiang pancang

No.	Tipe Tiang Pancang	Faktor Empirik	
		$F_b$	$F_s$
1.	Tiang bor	3,50	7,00
2.	Baja	1,75	3,50
3.	Beton pratekan	1,75	3,50

Tabel 3. Faktor empirik  $\alpha_s$  untuk tiap jenis tanah

No.	Tipe Tanah	$\alpha_s$ (%)
1.	Pasir	1,4
2.	Pasir kelanauan	2,0
3.	Pasir kelanauan dengan lempung	2,4
4.	Pasir kelanauan dengan lanau	2,8
5.	Pasir berlempung	3,0
6.	Lanau	2,2
7.	Lanau berlempung dengan pasir	2,8
8.	Lanau berlempung	3,0
9.	Lempung pasir	3,0
10.	Lanau berlempung	2,4
11.	Lempung berpasir	2,4
12.	Lempung berpasir dengan lanau	2,8
13.	Lempung berlanau dengan pasir	3
14.	Lempung berlanau	4
15.	Lempung	6

**Kapasitas Daya Dukung Pondasi *Bored Pile* dari hasil *Standart Penetration Test (SPT)***

Kapasitas daya dukung ujung pondasi *bored pile* berdasarkan hasil SPT baik pada tanah non kohesif (pasir) dan tanah kohesif (lempung) dijelaskan dalam persamaan dibawah ini.

*Pada tanah non kohesif (pasir)*

Kapasitas daya dukung ujung tiang adalah:

$$Q_p = 40 \times N_{SPT} \times \frac{L_b}{D} \times A_p \quad (4)$$

dan nilai

$$Q_p \leq 400 \times N_{SPT} \times A_p \quad (5)$$

Kapasitas daya dukung selimut tiang adalah:

$$Q_s = 2 \times N_{SPT} \times A_s \times L_i \quad (6)$$

*Pada tanah kohesif (lempung)*

Kapasitas daya dukung ujung tiang adalah:

$$Q_p = 9 \times c_u \times A_p \quad (7)$$

Kapasitas daya dukung selimut tiang adalah:

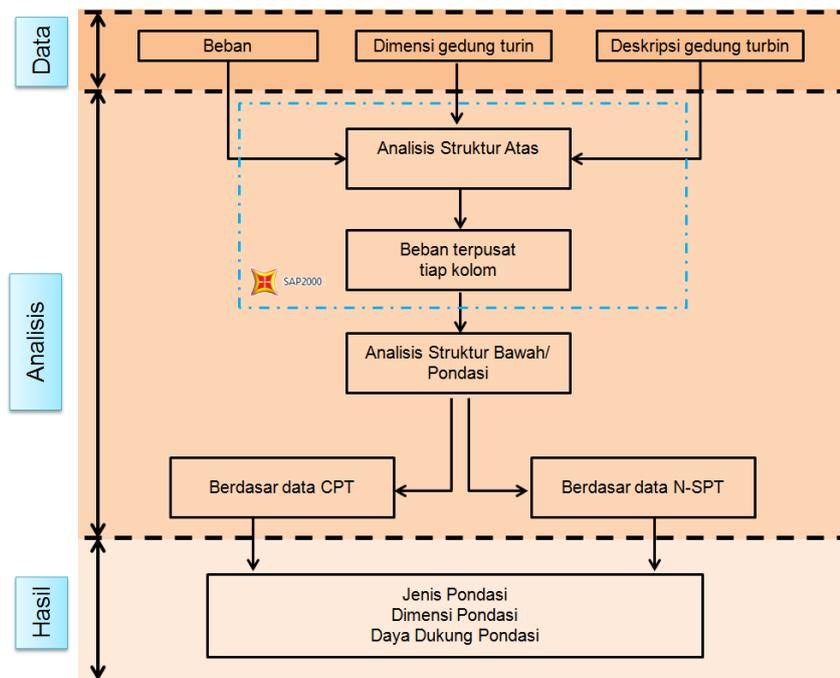
$$Q_s = \alpha \times c_u \times A_s \times L_i \quad (8)$$

dimana:

- $Q_p$  adalah kapasitas daya dukung ujung tiang (ton)
- $Q_s$  adalah kapasitas daya dukung selimut tiang (ton)
- $A_p$  adalah luas penampang tiang ( $m^2$ )
- $L_b$  adalah tebal lapisan tanah (m)
- $L_i$  adalah panjang lapisan tanah (m)
- $\alpha$  adalah koefisien adhesi antara tanah dengan tiang
- $c_u$  adalah kohesi undrained ( $t/m^2$ )
- $D$  adalah diameter tiang (m)
- $A_s$  adalah keliling tiang (m)

### METODOLOGI

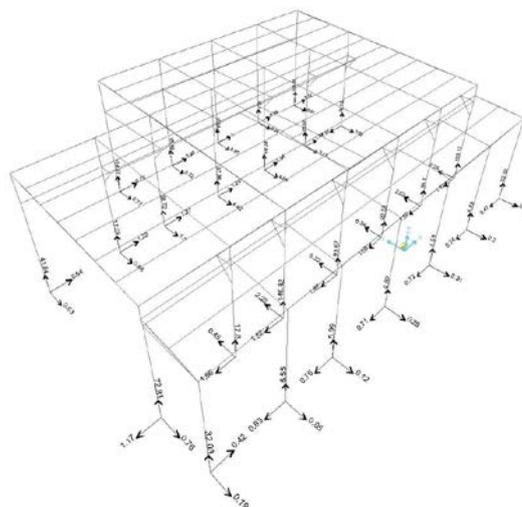
Metodologi penelitian dilakukan baik dengan cara studi pustaka maupun penggunaan program analisis struktur. Studi pustaka merupakan sarana mendapatkan pengetahuan terkait perencanaan desain pondasi yang berasal dari berbagai literatur termasuk hasil penelitian sebelumnya. Hasil analisis struktur gedung turbin dengan bantuan *software* SAP2000 berupa reaksi tumpuan atau beban terpusat di setiap kolom dijadikan sebagai nilai perbandingan terhadap besaran daya dukung dari pondasi yang direncanakan. Diagram alir penelitian dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 2. Metodologi perencanaan desain pondasi gedung turbin

### Hasil analisis struktur atas gedung turbin

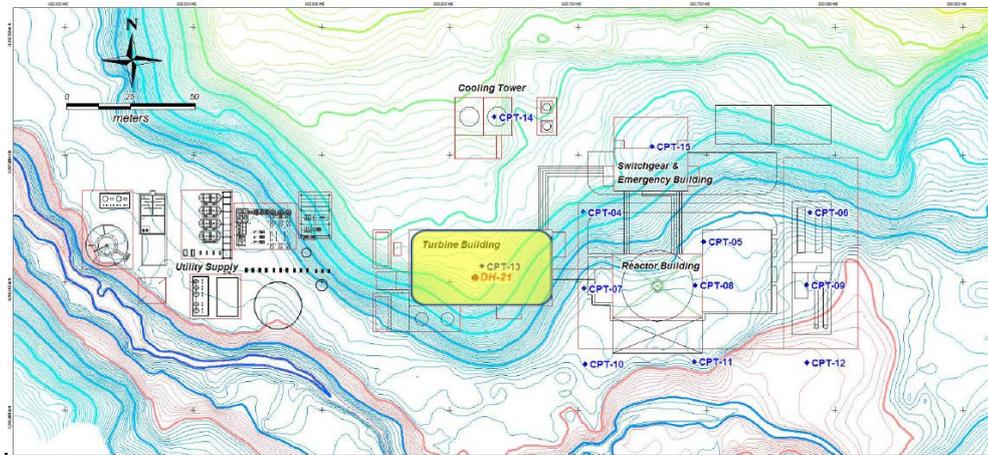
Dengan bantuan *software* SAP2000 telah dilakukan desain awal struktur gedung turbin kemudian dianalisis dengan hasil reaksi tumpuan maksimum adalah 146 ton sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 3. Reaksi tumpuan sebagai hasil analisis struktur gedung turbin dalam ton

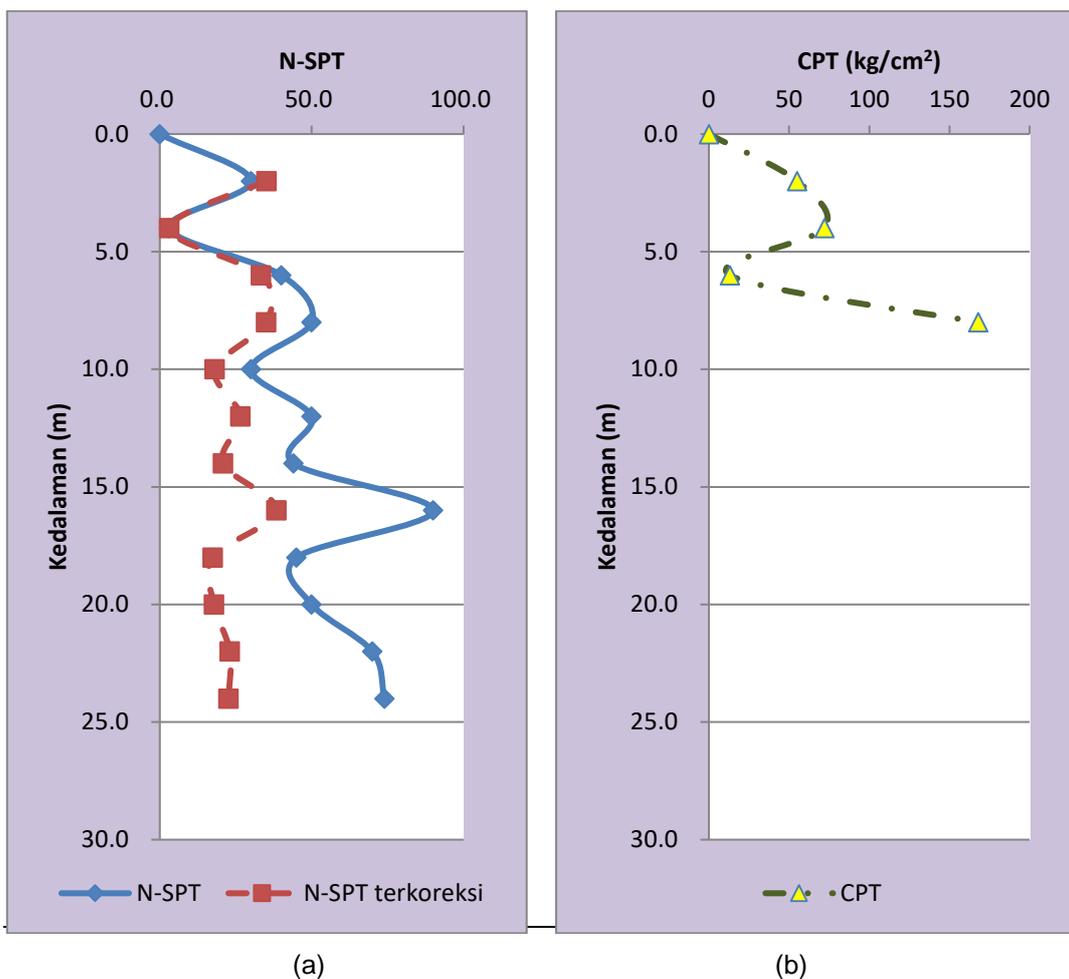
**Hasil uji lapangan lokasi sekitar gedung turbin**

Pada tahun 2014 telah dilakukan kegiatan pemboran geoteknik DH-21 dan pengujian lapangan SPT dan CPT-13. Gambar 4 menunjukkan lokasi titik-titik uji yang dimaksud.



Gambar 4. Lokasi bor geoteknik DH-21 dan titik uji CPT-13

Hasil pengujian dilapangan SPT yang berupa nilai N-SPT dan N-SPT terkoreksi ditampilkan pada Gambar 5(a) sedangkan untuk nilai CPT dapat dilihat pada Gambar 5(b).



Gambar 5. Reaksi tumpuan sebagai hasil analisis struktur gedung turbin dalam ton

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil evaluasi tapak menyebutkan bahwa klasifikasi tapak RDE termasuk kedalam Tapak Tipe 3 atau Tapak Tanah Sedang dengan nilai kecepatan gelombang geser ( $V_s$ ) untuk kedalaman 30 m adalah 268 m/s dan nilai  $N_{SPT}$  rata-rata 40.6. Lebih lanjut bahwa dari hasil ini jenis pondasi yang dapat dijadikan pilihan adalah pondasi tiang (*bored pile*). Deskripsi tanah dilokasi gedung turbin diambil adri hasil bor geoteknik DH-21 dengan perincian sebagaimana terlihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Deskripsi tanah berdasarkan kedalaman pada titik bor DH-21

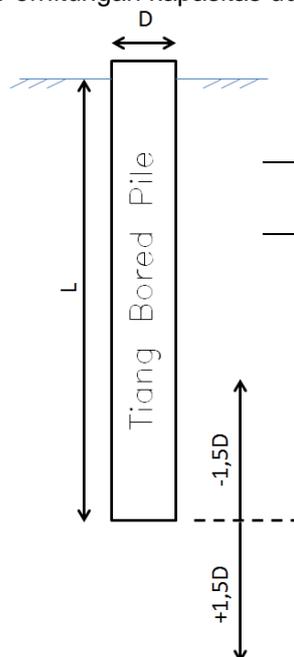
Kedalaman (m)	Deskripsi Tanah
0.00-1.84	Tanah organik, berwarna coklat kemerahan gelap
1.84-9.67	Pasir dengan kerikil, berwarna coklat kehijauan terang
9.67-21.00	Pasir, berwarna putih kehijauan terang. $N_{SPT} = 30-50$
21.00-24.70	Kerikil bercampur pasir, berwarna coklat kehijauan terang . $N_{SPT} > 50$
24.70-32.68	Pasir, berwarna coklat kehijauan terang
32.68-34.30	Kerikil bercampur pasir, berwarna coklat kehijauan terang
34.30-35.00	Batu lempung kelanauan, berwarna abu-abu kehijauan gelap
35.00-38.55	Batu bercampur dengan lempung
38.55-40.80	Batu lempung kelanauan
40.80-44.20	Batu bercampur dengan lempung
44.20-50.00	Batu lempung kelanauan

### Perhitungan Kapasitas Daya Dukung Pondasi Tiang dari hasil *Cone Penetration Test (CPT) / Sondir*

Kapasitas daya dukung pondasi dihitung berdasarkan metode Aoki De Alemar dengan data *bored pile* adalah sebagai berikut:

- Diameter (D) = 0,80 m dan 1,00 m
- Keliling ( $A_s$ ) = 2,51 m dan 3,14 m
- Luas ( $A_p$ ) = 0,50 m<sup>2</sup> dan 0,78 m<sup>2</sup>

a. Perhitungan kapasitas dukung ujung untuk pondasi *bored pile* diameter 0,80 m.



Tabel 5. Nilai perlawanan konus titik bor DH-21

Kedalaman (m)	Perlawanan konus (kg/cm <sup>2</sup> )
5,4	16
5,6	14
5,8	14
6,0	13
6,2	25
6,4	40
6,6	55
6,8	105
7,0	110
7,2	138
7,4	150
7,6	152
7,8	158
8,0	168
8,2	215
8,4	292
8,6	350

Nilai  $q_{ca}$  diambil rata-rata dari ujung bored pile dengan jarak +1,5 kali diameter bored pile sampai -1,5 kali diameter bored pile.

$$q_{ca} = (16+14+14+13+25+40+55+105+110+138+150+152+158+168+215+292+350)/17 \\ = 117,59 \text{ kg/cm}^2$$

Dengan nilai  $q_{ca \text{ (base)}}$  sama dengan  $q_{ca}$  maka tahanan ujung persatuan luas dihitung sebagai berikut:

$$q_b = \frac{q_{ca \text{ (base)}}}{F_b} \text{ dengan nilai } F_b \text{ diambil dari Tabel 2 untuk tiang bor 3,5} \\ = \frac{117,59}{3,5} \\ = 33,60 \text{ kg/cm}^2$$

Kapasitas daya dukung ujung bored pile menjadi

$$Q_p = q_b \times A_p \\ = 33,60 \text{ kg/cm}^2 \times 5024 \text{ cm}^2 \\ = 168789,51 \text{ kg} \\ = 168,78 \text{ ton}$$

b. Perhitungan kapasitas dukung ujung untuk pondasi *bored pile* diameter 0,80 m.

$$f = \frac{q_c \text{ (side)} \times \alpha s}{F_s} \\ = \frac{37,56 \times 0,02}{7} \\ = 0,38 \text{ kg/cm}^2$$

Kapasitas daya dukung selimut tiang  $Q_s$

$$Q_s = f \times A_s \\ = 0,38 \text{ kg/cm}^2 \times 175840 \text{ cm}^2 \\ = 66037,69 \text{ kg} \\ = 66,04 \text{ ton}$$

Jadi kapasitas daya dukung ultimate pondasi bore pile adalah

$$Q_u = Q_p + Q_s \\ = 168,78 \text{ ton} + 66,04 \text{ ton} \\ = 234,83 \text{ ton}$$

### Kapasitas Daya Dukung Pondasi Tiang dari hasil *Standart Penetration Test (SPT)*

Berdasarkan hasil pemboran geoteknik lapisan tanah disekitar gedung turbin tersusun dari pasir sehingga dalam menghitung kapasitas daya dukung digunakan persamaan 4 dan 5. Kapasitas daya dukung ujung tiang diameter 0,80 m pada tanah non kohesif dengan kedalaman 7 m adalah sebagai berikut:

$$Q_p = 40 \times N_{SPT} \times \frac{L_b}{D} \times A_p \\ = 40 \times 10 \times \frac{1}{0,8} \times 0,5024 \\ = 251,5 \text{ ton}$$

Kapasitas daya dukung selimut tiang adalah

$$Q_s = 2 \times N_{SPT} \times A_s \times L_i \\ = 2 \times 10 \times 1,57 \times 1 \\ = 31,55 \text{ ton}$$

Jadi kapasitas daya dukung ultimate pondasi bore pile adalah

$$\begin{aligned} Q_u &= Q_p + Q_s \\ &= 251,5 \text{ ton} + 31,55 \text{ ton} \\ &= 282,75 \text{ ton} \end{aligned}$$

Tabel 6. Kapasitas daya dukung berdasarkan data hasil uji CPT dan SPT

Diameter bored pile (m)	Kapasitas Daya dukung ultimate ( $Q_u$ ) (ton)	
	CPT	SPT
0,8 m	234,83	282,75
1,0 m	289,43	376,80

Tabel 6 menunjukkan perbandingan nilai kapasitas daya dukung untuk *bored pile* diameter 0,80 m dan 1,00 m yang dihitung berdasarkan data hasil uji CPT dan SPT. Sebagai pengendalian terhadap desain hasil kapasitas daya dukung perlu dikalikan dengan faktor keamanan (SF) dalam hal ini ambil nilai SF = 2,5 maka daya dukung ijin *bored pile* sebagaimana dapat dilihat dalam Tabel 7.

Tabel 7. Kapasitas daya dukung ijin dengan SF 2,5

Diameter bored pile (m)	Kapasitas Daya dukung ultimate ( $Q_u$ ) (ton)	
	CPT	SPT
0,8 m	93,93	113,10
1,0 m	115,77	150,72

Hasil perhitungan berdasarkan data hasil uji lapangan CPT diperoleh kapasitas daya dukung ijin dengan SF 2,5 masing untuk *bored pile* diameter 0,80 m adalah 93,93 ton dan *bored pile* diameter 1,00 m adalah 115,77 ton. Sedangkan untuk perhitungan yang berdasar data hasil uji lapangan SPT diperoleh kapasitas daya dukung ijin dengan SF 2,5 masing untuk *bored pile* diameter 0,80 m adalah 113,10 ton dan *bored pile* diameter 1,00 m adalah 150,72 ton.

## KESIMPULAN

Mengacu pada hasil analisis struktur gedung turbin RDE dan perhitungan daya dukung pondasi *bored pile* disimpulkan bahwa:

1. Pemilihan jenis pondasi sangat tergantung pada beberapa faktor seperti keadaan tanah dasar, besarnya beban yang bekerja, dan termasuk juga biaya konstruksi. Khusus pembebanan yang dalam hal ini adalah beban mati, beban hidup, dan beban gempa. Oleh karena itu, dalam penelitian kali ini gedung turbin RDE didesain dengan menggunakan pondasi tiang (*bored pile*).
2. Kapasitas daya dukung ijin dengan SF 2,5 dari data SPT memberikan nilai lebih besar jika dibandingkan dengan kapasitas daya dukung ijin dengan SF 2,5 dari data CPT. Selain alasan konservatif, hasil SPT lebih dapat mewakili kondisi di lapangan jadi untuk keperluan desain dapat diambil kapasitas daya dukung dengan SF 2,5 untuk *bored pile* diameter 0,80 m adalah 113,10 ton dan *bored pile* diameter 1,00 m adalah 150,72 ton.
3. Berdasarkan hasil penelitian menunjukkan bahwa tipe pondasi tiang *bored pile* dengan diameter 1,00 m dan panjang tiang 7 m dapat menjadi pilihan pondasi gedung turbin mengingat daya dukung yang dihasilkan adalah 150,72 ton lebih besar dari nilai reaksi atas beban yang bekerja yaitu 146 ton.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai oleh program Insentif Riset Sistem Inovasi Nasional (INSINAS) Tahun 2018 dari Kementerian Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi.

## DAFTAR PUSTAKA

1. WIDOJOKO L, "Analisa dan Desain Pondasi Tiang Pancang Berdasarkan Bentuk Tiang", Jurnal Teknik Sipil Universitas Bandar Lampung, Volume 6, No. 2, Hal. 818-842, Bandar Lampung (2015).
2. Prakash, S and Puri Vijay K, "Foundation for Machine : Analysis and Design", John Willey and Sons, New York (1988).
3. Sidartha, S.A. Analisis Pondasi Dinamis untuk Mendukung Mesin Generator Pembangkit Listrik Tenaga Uap", ITS, Surabaya (1996)
4. SUNTOKO H dkk, "Design of Reinforce Concrete Shear Wall of Reactor Building, Experimental Power Reaktor," SENTEN, Palembang (2018)
5. DAS B, "Principle of Geotechnical Engineering 7th Edition", Stamford: Cengage Learning. (2010)
6. DAS B, "Principle of Foundation Engineering 7th Edition", Stamford: Cengage Learning (2011)
7. KURNIAWAN A, "Alternatif Perencanaan Pondasi Tiang untuk Gedung Tinggi di Atas Tanah Lunak pada Proyek Pembangunan Kota Baru Summarecon-Bandung", Jurnal Teknik ITS, Volume 5, No. 2, Hal. D70-D73, Surabaya (2016)
8. No.2 83-99. Reese, L. C., et. al.' "Analysis and Design of Shallow and Deep Foundation", John Wiley & Sons. (2006)
9. Decourt, L, "Prediction of load-settlement relationship for foundations on the basis of the SPT-T", Proceedings 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro, Brazil. (1995)
10. K., Sorensen, and Okkels N, "Correlation between drained shear strength and palsticity index of undisturbed over consolidated lays." 18th Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Paris. 423-428. (2013)

## DISKUSI/TANYA JAWAB

### 1. PERTANYAAN :

- Seberapa besar faktor litologi dalam desain?
- Kontur dengan kemiringan lereng yang curam akan mempengaruhi pondasi seberapa besar pengaruhnya?

### JAWABAN :

- Litologi dapat menjelaskan kondisi material dibawah permukaan. Dengan diketahuinya jenis tanah dan batuan akan sangat membantu dalam menentukan parameter desain nantinya. Sebagai contoh pertimbangan desain akan berbeda ketika tanah pasir dengan tanah lempung.
- Tapak RDE eksisting memang memiliki kontur dengan beda tinggi yang besar anatar sisi utara dengan sisi selatan, namun demikian berdasarkan desain awal akan dilakukan pekerjaan galian dan timbunan hingga level rencana. Kemudian pondasi masing-masing bangunan akan dibuat dengan mempertimbangkan hasil uji tanah dan batuan yang sudah dilakukan sebelumnya. Setelah itu, dapat dilanjutkan ketahap konstruksi gedung reaktor, turbin dan fasilitas lain.

Halaman ini sengaja di kosongkan

## PERHITUNGAN FLUKS NEUTRON PADA POSISI ELEMEN BAKAR TERAS 90 RSG GAS MENGUNAKAN PAKET PROGRAM BATAN-3DIFF

Elisabeth Ratnawati<sup>1</sup> dan Sutrisno<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Pusat Reaktor Serba Guna, BATAN

Kawasan Puspiptek Gd 31, Serpong Tangerang Selatan, 15310

Email : betty@batan.go.id

### ABSTRAK

**PERHITUNGAN FLUKS NEUTRON PADA POSISI ELEMEN BAKAR TERAS 90 RSG GAS MENGGUNAKAN PAKET PROGRAM BATAN-3DIFF.** Perhitungan fluks neutron thermal secara axial pada posisi elemen bakar diperlukan untuk mengetahui akurasi perhitungan fluks neutron dengan BATAN-3DIFF dibandingkan dengan hasil eksperimen. Perbandingan hasil fluks neutron dilakukan untuk satu posisi aksial di 4 posisi bahan bakar yang berada di 4 pojok teras aktif, A-4, A-9, H-4 dan H-9. Hasil perhitungan dibandingkan dengan hasil eksperimen menunjukkan perbedaan yang cukup besar karena perbedaannya antara 13,9% - 28,1%. Nilai ini melebihi 10% yang dipakai sebagai batas akurasi dalam perhitungan fluks neutron. Perbedaan yang besar ini diakibatkan nilai perhitungan belum dikali faktor heterogenitas bahan bakar yang mengakibatkan fluks neutron di kanal bahan bakar berbeda dengan fluks neutron rerata di sepanjang daerah bahan bakar. Kajian tentang hal ini perlu dilakukan untuk penelitian berikutnya.

Kata kunci : fluks neutron, elemen bakar reaktor, batan-3diff

### ABSTRACT

**CALCULATION OF NEUTRON FLUX AT THE POSITION FUEL ELEMENTS TERRACE 90 OF GAS RSG USING BATAN-3DIFF PROGRAMS.** Calculation of axial thermal neutron flux at the position of the fuel element is needed to determine the accuracy of neutron flux calculations with BATAN-3DIFF compared to the experimental results. Comparison of neutron flux results was carried out for 1 axial position in 4 fuel positions in 4 active terrace corners, A-4, A-9, H-4 and H-9. The results of calculations compared with the experimental results show a considerable difference because of the difference between 13.9% - 28.1%. This value exceeds 10% which is used as an accuracy limit in calculating neutron flux. This large difference is due to the calculation value has not multiplied the factor of fuel heterogeneity which causes neutron flux in the fuel channel to be different from the average neutron flux along the fuel area. A study of this matter needs to be done for the next research.

Key words ; fluks neutron, fuel elemen, batan-3diff

### PENDAHULUAN

Reaktor RSG-GAS adalah jenis reaktor riset dengan daya nominal 30 MW, menggunakan air ringan sebagai pendingin teras dan juga sebagai moderator. Komponen-komponen teras reaktor disusun pada kisi-kisi yang terdiri atas 10 x 10 posisi. Kisi-kisi dikelilingi oleh selubung teras untuk mengarahkan aliran pendingin agar melewati komponen-komponen teras reaktor. Konfigurasi teras setimbang (*typical working core, TWC*) silisida RSG-GAS terdiri atas 40 elemen bakar standar (EB), 8 elemen bakar kendali (EK). Setiap elemen bakar standar terdiri dari 21 pelat dan 15 pelat pada setiap elemen kendali. Bahan ketongsong elemen bakar terbuat dari paduan Aluminium, yaitu AlMg2[1].

Operasi rutin reaktor RSG-GAS menggunakan 4 detektor *unbalance*, sering disebut *unbalance load detector*, untuk memantau kerataan fluks neutron di teras. Sistem ini digunakan untuk menjamin kerataan pembangkitan panas di bahan bakar. Disamping itu, terdapat sistem pengukur laju dosis gamma dalam sistem pendingin primer. Seluruh sistem itu dapat juga dipakai dalam memantau terjadinya perubahan fungsi struktur, sistem atau komponen (SSK) akibat terpapar radiasi.

Batasan operasi mengizinkan terjadinya *unbalance* sebesar 16% dan jika melebihi batasan tersebut reaktor akan mengalami *scram*. Beberapa kejadian *scram* di reaktor RSG-

GAS terjadi karena sinyal detektor *unbalance* melampaui batasan itu. Oleh karena itu dalam LAK dianjurkan untuk melakukan pemantauan fluks neutron di teras reaktor[1].

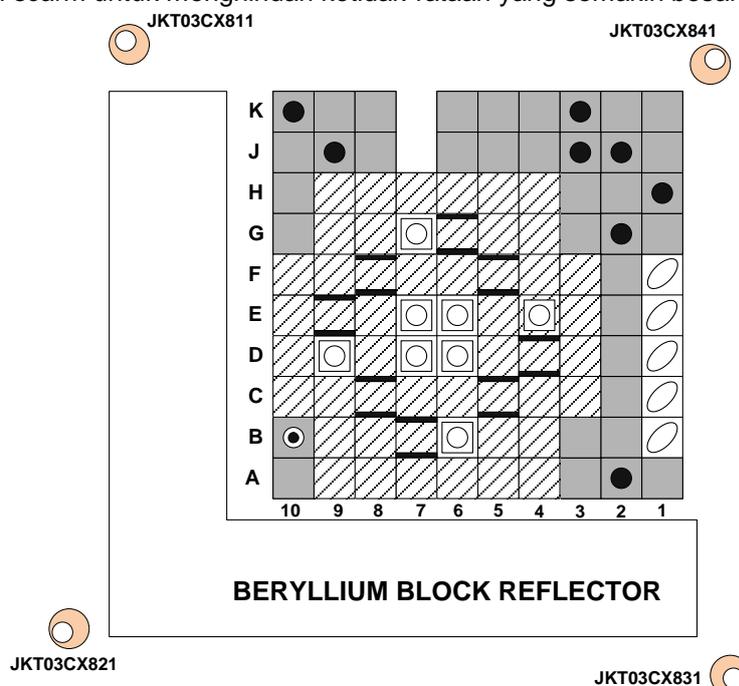
Penelitian sebelumnya telah melakukan pengukuran fluks neutron di beberapa posisi bahan bakar untuk konfigurasi teras 90 reaktor RSG-GAS[2]. Penelitian tersebut bertujuan untuk mengetahui kerataan fluks neutron di teras dengan metode aktivasi keping emas. Pada penelitian ini, akan dilakukan perbandingan fluks neutron di bahan bakar antara hasil eksperimen metode aktivasi keping dan perhitungan dengan metode difusi neutron, BATAN-3DIFF[3].

Tujuan makalah ini adalah untuk mengetahui akurasi perhitungan fluks neutron dengan BATAN-3DIFF dibandingkan dengan hasil eksperimen. Perbandingan hasil fluks neutron dilakukan untuk satu posisi aksial di 4 posisi bahan bakar yang berada di 4 pojok teras aktif, A-4, A-9, H-4 dan H-9. Motivasi memilih satu posisi aksial adalah karena keterbatasan foil dan juga penelitian fokus kepada kerataan fluks neutron ke arah radial (dengan tinggi foil yang sama) di beberapa bahan bakar. Idealnya eksperimen dilakukan untuk beberapa titik ke arah aksial, meskipun demikian penelitian ini adalah sebagai kajian awal sebelum nanti melakukan untuk beberapa titik aksial.

Program BATAN-3DIFF telah diverifikasi dan divalidasi dengan teras pertama reaktor RSG-GAS dengan hasil yang memuaskan[3]. Penelitian ini sangat bermanfaat untuk menentukan posisi bahan bakar yang representatif mewakili fluks neutron di 4 posisi detektor *unbalance*. Dengan demikian akan dapat ditentukan posisi radial bahan bakar yang optimum untuk mamantau kerataan fluks neutron di teras. Dalam makalah ini, metodologi perhitungan disajikan sebelum melakukan pembahasan. Makalah ditutup dengan beberapa kesimpulan yang dapat dipakai dalam penelitian lanjutannya.

### DESKRIPSI SISTEM UNBALANCE RSG-GAS DAN METODOLOGI

Reaktor RSG-GAS memiliki sistem deteksi ketidakseimbangan fluks neutron, disebut *unbalanced detector*, sebanyak 4 buah detektor CIC (*Compensated Ionization Chamber*) untuk mencegah terjadinya ketidak-simetrisan distribusi fluks neutron akibat ketidak rataan posisi batang kendali atau kejadian penyumbatan celah bahan bakar. Gambar 1 menunjukkan posisi 4 detektor *unbalance*. Keempat detektor tersebut diberi nama JKT03 CX811, CX821, CX831 dan CX841. Jika hasil detektor menunjukkan perbedaan 16% maka reaktor akan di *scarm* untuk menghindari ketidak-rataan yang semakin besar.



Gambar 1. Lokasi detektor *unbalance*, JKT03 (CX811, CX821, CX831, and CX841)  
 Mengingat posisi detektor berada di 4 pojok teras, maka diyakini fluks neutron di 4 detektor secara radial setara dengan 4 posisi bahan bakar di 4 posisi pojok teras aktif, A-4, A-9, H-4 dan H-9. Tabel 1 menunjukkan hasil pengukuran fluks neutron termal di 4 bahan bakar yang diperoleh dari penelitian sebelumnya [2]. Fluks neutron diperoleh dari keping yang diletakkan di posisi tengah aksial (kira-kira 30 cm).

Table 1 Fluks neutron thermal di bahan bakar pada posisi A-4, A-9, H-4 dan H-9

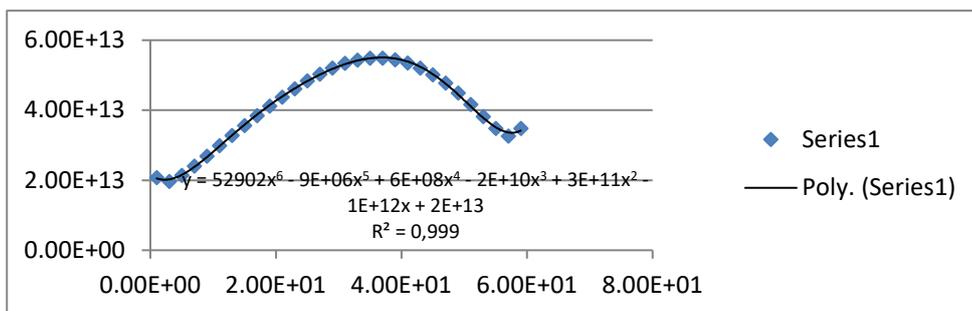
Posisi Bahan Bakar	Fluks neutrom termal (n/cm <sup>2</sup> .det)
A-4	(3,297±0,152).10 <sup>13</sup>
A-9	(2,795±0,218).10 <sup>13</sup>
H-4	(2,417±0,110).10 <sup>13</sup>
H-9	(2,939±0,136).10 <sup>13</sup>

Perhitungan fluks neutron dengan program BATAN-3DIFF dilakukan dengan :

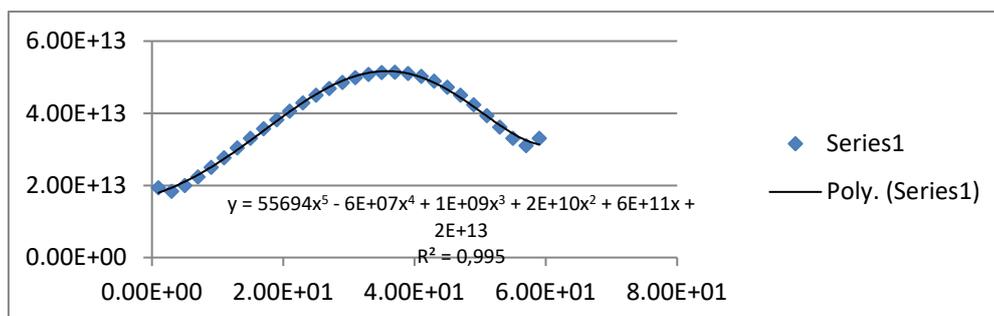
1. Menggenerasi tampang lintang makroskopis untuk seluruh bahan bakar sesuai dengan tingkat fraksi bakar dari program manajemen teras BATAN-FUEL
2. Posisi batang kendali ditetapkan sesuai dengan eksperimen 344 mm atau 256 mm dari posisi atas teras aktif.
3. Pendefinisian mesh agar tepat berada di posisi tengah bahan bakar. Jika tidak memungkinkan maka diambil pereratan beberapa titik mesh disekitar posisi tengah
4. Teras reaktor RSG-GAS dimodelkan secara 3-dimensi
5. Penentuan harga fluks dilakukan pada daya 15 MW.
6. Perbedaan antara eksperimen dan perhitungan dinyatakan dalam prosentase perbedaan relatif

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

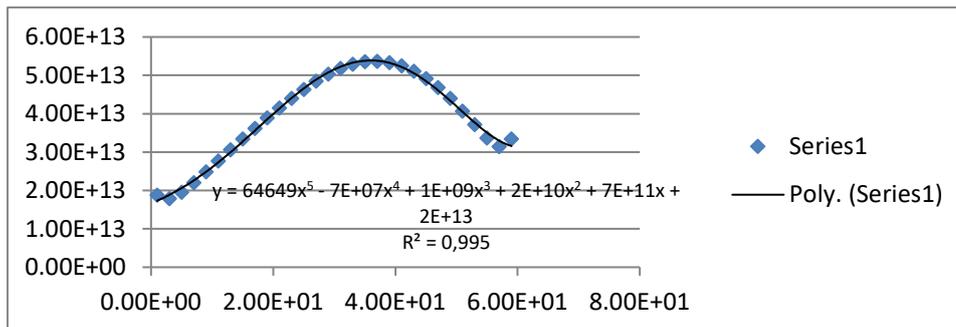
Hasil perhitungan besaran fluks neutron pada posisi elemen bakar A-4, A-9, H-4 dan H-9 dengan menggunakan paket program Batan-3DIFF, Gambar 2-5 dan Tabel 2, menunjukkan bahwa posisi H-9 memiliki perbedaan yang paling kecil dengan hasil eksperimen (13,9%) sedangkan posisi A-9 memiliki perbedaan paling besar yaitu 28,1%. Perbedaan ini disebabkan karena kondisi pengukuran yang berbeda antara eksperimen dan perhitungan dengan menggunakan paket program Batan-3DIFF. Dalam eksperimen sulit untuk memastikan apakah foil tepat berada pada posisi tengah secara axial. Faktor jarak dan pemakaian keping menyumbang hasil ketidakpastian dari perhitungan dalam eksperimen. Disamping itu dalam eksperimen pengukuran fluks neutron secara axial pada posisi bahan bakar, penggunaan *wire* sebagai monitor fluks akan memberikan hasil yang lebih akurat dibandingkan penggunaan keping. Meskipun demikian untuk perbedaan yang berkisar antara 13,9-28,1% pada penelitian ini sudah dianggap cukup memadai. Berikut adalah grafik perhitungan fluks neutron secara axial untuk keempat posisi elemen bakar.



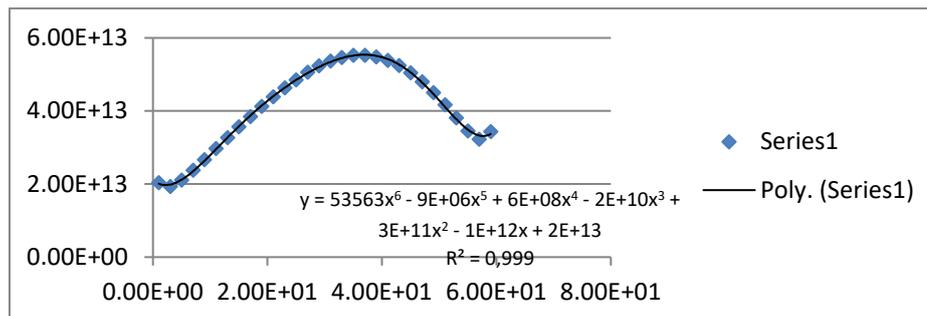
Gambar 2: Grafik perhitungannya fluks neutron secara Axial pada posisi A-4



Gambar 3: Grafik perhitungannya fluks neutron secara Axial pada posisi A-9.



Gambar 4: Grafik perhitungan fluks neutron secara Axial pada posisi H-4



Gambar 5: Grafik perhitungan fluks neutron secara Axial pada posisi H-9

Persamaan yang diperoleh digunakan untuk menghitung nilai rerata dari perhitungan secara axial yang akan dibandingkan dengan hasil eksperimen. Berikut adalah tabel hasil perhitungan fluks neutron ada keempat posisi elemen bakar RSG GAS

Tabel 2. Perbandingan Hasil Perhitungan Fluks Neutron Thermal

POSISI	FLUKS NEUTRON (n/cm2.det)
<b>A-4</b>	
EKSPERIMEN	3.297E+13
BATAN-3DIFF	2.586E+13
%	21.5
<b>A-9</b>	
EKSPERIMEN	2.794E+13
BATAN-3DIFF	3.581E+13
%	-28.1
<b>H-4</b>	
EKSPERIMEN	2.417E+13
BATAN-3DIFF	3.087E+13
%	-27.7
<b>H-9</b>	
EKSPERIMEN	2.939E+13
BATAN-3DIFF	2.530E+13
%	13.9

Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 2 nampak bahwa hasil perhitungan tidak menunjukkan kecenderungan yang sama. Pada posisi H-9 dan A-4 hasil eksperimen lebih tinggi daripada hasil perhitungan. Sedangkan pada posisi H-4 dan A-9 hasil perhitungan memiliki nilai yang lebih tinggi dari hasil eksperimen. Hal ini menunjukkan bahwa perbandingan data eksperimen dan hasil perhitungan tidak dapat dibandingkan secara langsung. Fakta ini dapat dimengerti karena hasil eksperimen menunjukkan fluks neutron di

celah pendingin yang ditengah sedangkan hasil perhitungan adalah nilai fluks neutron di tengah pada daerah homogenisasi bahan bakar.

Jika dipakai rumus perhitungan *unbalance* seperti disajikan di penelitian sebelumnya [4], hasil eksperimen fluks neutron menunjukkan bahwa besarnya unbalance sebesar 2,37%. Hasil perhitungan menunjukkan unbalance sebesar 21,55%. Hal ini makin meyakinkan bahwa keduanya memang tidak dapat dibandingkan secara langsung. Kemudian, jika dipakai hasil perhitungan fluks neutron thermal rerata di satu perangkat bahan bakar, maka nilai *unbalance* menjadi 3,54%. Hal ini sesuai dengan hasil eksperimen. Oleh karena itu hasil perhitungan fluks neutron berdasarkan titik mesh perlu dikoreksi dengan faktor efek heterogenitas bahan bakar antara nilai rerata dan nilai di kanal pendingin. Oleh karena itu penelitian lanjutan tentang ini perlu dilakukan.

### **KESIMPULAN**

Hasil perhitungan dibandingkan dengan hasil eksperimen menunjukkan perbedaan yang cukup besar karena perbedaannya antara 13,9% - 28,1%. Nilai ini melebihi 10% yang dipakai sebagai batas akurasi dalam perhitungan fluks neutron. Investigasi yang dalam menunjukkan bahwa perbedaan yang besar ini diakibatkan nilai perhitungan belum dikali faktor heterogenitas bahan bakar yang mengakibatkan fluks neutron di kanal bahan bakar berbeda dengan fluks neutron rerata di sepanjang daerah bahan bakar. Kajian tentang hal ini perlu dilakukan untuk penelitian berikutnya.

### **DAFTAR PUSTAKA**

1. Laporan Analisis Keselamatan RSG GAS, revisi 10.1, Bab V, Desember 2011.
2. Elisabeth Ratnawati, Penentuan Fluks Neutron Thermal Dan Epithermal Elemen bakar Teras 90 RSG GAS, Prosiding Seminar Nasional SDM Teknologi Nuklir, STTN, 2016.
3. P. H. Liem, "Validation of BATAN'S Standard 3-D Diffusion Code, BATAN-3DIFF, on the First Core of RSG GAS," *Atom Indonesia*, vol. 25, no. 1, pp. 47–53, 1999.
4. Tagor Malem Sembiring, Kristedjo Kurnianto, Mochamad Imron, Abdul Azis Rohman Hakim, Preliminary Analysis of the Unbalanced Load Detection System in the RSG-GAS Reactor, Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir 2016, pp 521-528.

Halaman ini sengaja di kosongkan

## **STUDI KARAKTERISTIK PRODUK HASIL FISI REAKTOR RISET BERBASIS URANIUM SILISIDA PADA BERBAGAI LEVEL DAYA**

**Anis Rohanda<sup>1,2</sup>, Abdul Waris<sup>1</sup>, Slamet Suprianto<sup>3</sup>, Rizal Kurniadi<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Departemen Fisika Institut Teknologi Bandung

Jl. Ganeca, Lb. Siliwangi, Coblong, Bandung 40312

<sup>2</sup>Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir (PTKRN) - BATAN

Kawasan PUSPIPTEK Gd. No. 80 Serpong, Tangerang Selatan 15310

<sup>3</sup>Pusat Reaktor Serba Guna (PRSG) - BATAN

Kawasan PUSPIPTEK Gd. No. 30 Serpong, Tangerang Selatan 15310

email: anis\_rohanda@batan.go.id

### **ABSTRAK**

**STUDI KARAKTERISTIK PRODUK HASIL FISI REAKTOR RISET BERBASIS URANIUM SILISIDA PADA BERBAGAI LEVEL DAYA.** Reaksi fisi yang terjadi pada reaktor nuklir menghasilkan sejumlah nuklida yang bersifat radioaktif. Radionuklida tersebut memiliki karakteristik yang sangat penting untuk diketahui seperti : intensitas gamma, massa dan radioaktivitas. Pengamatan karakteristik kumpulan radionuklida atau disebut inventori, sangat penting dilakukan guna mendukung aspek keselamatan operasi dan manajemen bahan bakar di dalam teras reaktor. Penelitian dilakukan dengan menggunakan kode komputer ORIGEN2 berbasis reaktor riset Reaktor Serba Guna G.A Siwabessy (RSG-GAS) dengan teras uranium silisida pada berbagai level daya. Hasil penelitian juga bermanfaat sebagai data awal penentuan dosis atau paparan radiasi dan dapat dikembangkan untuk keperluan analisis keselamatan radiasi lainnya seperti perhitungan tebal perisai radiasi dan pengaturan jam kerja bagi pekerja radiasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa intensitas sumber gamma semakin naik sebanding dengan daya reaktor dengan kontribusi terbesar berasal dari intensitas foton gamma kategori fission products. Pola spektrum gamma yang dihasilkan identik dengan pola spektrum reaktor sejenis yang berbasis bahan bakar uranium molibdenum pada daya yang sama. Kenaikan daya menyebabkan penurunan massa U-235 sebagai bahan fisil sekitar 2% tiap step dan hampir tidak menyebabkan perubahan massa U-238. Kenaikan daya juga mengakibatkan massa pengotor reaktor (racun neutron : Xe-135 & Sm-149) semakin bertambah, dan radioaktivitas U-235 & U-238 relatif tetap sedangkan radioaktivitas bahan non fisil memiliki tren semakin naik sebagai fungsi waktu.

Kata kunci: produk fisi, uranium silisida, RSG-GAS, ORIGEN2

### **ABSTRACT**

**STUDY OF FISSION PRODUCT CHARACTERISTICS OF RESEARCH REACTORS BASED ON URANIUM SILICIDES AT VARIOUS POWER LEVELS.** Fission reactions that occur in nuclear reactors produce a number of radioactive nuclides. The radionuclides has several characteristics that are very important to know, such as : gamma intensity, mass and radioactivity. Observation of radionuclide list or called by 'inventory' reactor characteristics is essential to support the safety aspects of operational reactor and fuel management in core. The study was conducted using ORIGEN2 computer code based on Reaktor Serba Guna G.A Siwabessy (RSG-GAS) research reactor with uranium silicide core at various power levels. The results of the study are also useful as initial data on dose determination or radiation exposure and it can be developed for other radiation safety purposes such as the radiation shield thickness and working time arrangements for radiation workers. The results showed that the intensity of the gamma source increased in proportion to the reactor power with the most contribution derived from the gamma intensity of fission products category. The gamma spectrum pattern result is identical to the spectral pattern of a similar type of reactor based on uranium molybdenum fuel at the same power level. The increase in power causes a decrease in U-235 mass as a fissile material of about 2% per step and does not cause U-238 mass changes. The increase in power also causes an increase in the reactor impurities mass (neutron poison: Xe-135 & Sm-149) and the radioactivity of U-235 & U-238 are relatively fixed while the radioactivity of non-fissile material has an increasing trend as a time function.

Keyword: fission product, uranium silicide, RSG-GAS, ORIGEN2

## PENDAHULUAN

Reaksi pembelahan inti yang terjadi pada teras reaktor nuklir menyebabkan terbentuknya unsur-unsur radioaktif dalam bentuk produk fisi (*fission product*), aktinida & anak luruhnya (*actinide & daughters*) dan juga produk aktivasi (*activation product*). Selama reaktor nuklir beroperasi, unsur-unsur radioaktif hasil fisi tersebut akan terus terbentuk dan terakumulasi pada perangkat bahan bakar nuklir[1]. Kumpulan dari unsur-unsur radioaktif hasil fisi, atau lazim disebut sebagai 'inventori'. Inventori hasil fisi memiliki beberapa karakteristik material inti atom yang sangat penting untuk diketahui antara lain : intensitas gamma, massa atau konsentrasi, radioaktivitas, daya termal, dan lain sebagainya. Pengamatan karakteristik inventori sangat penting dilakukan guna mendukung aspek keselamatan operasi dan terkait manajemen bahan bakar di dalam reaktor. Pengamatan karakteristik inventori hanya bisa dilakukan dengan simulasi menggunakan program komputer (*code*) yang telah diakui badan atom dunia (IAEA) dikarenakan sifatnya yang radioaktif. Perhitungan inventori hasil fisi yang didasarkan pada perhitungan gayut waktu (*time-dependent*) dapat ditentukan dengan *code* ORIGEN2 dari Radiation Safety Information Computational Center (RSICC) Oak Ridge National Laboratory (ORNL)[2]. ORIGEN2 telah digunakan secara luas untuk menghitung inventori hasil fisi pada teras reaktor. Dewasa ini telah dikembangkan program komputer sejenis yaitu ORIGEN-*Automatic Rapid Processing* atau dikenal dengan sebutan ORIGEN-ARP. ORIGEN-ARP terdapat dalam paket program (modul) SCALE5.1 bersama-sama dengan program yang lain seperti : GeeWiz, SAS4, dan Keno3d[3]. Namun ORIGEN-ARP memiliki keterbatasan hanya dapat digunakan untuk reaktor daya (PLTN), sedangkan ORIGEN2 dapat digunakan untuk simulasi pada reaktor riset dan reaktor daya[4].

Reaktor Serba Guna G.A Siwabessy atau biasa disebut RSG-GAS, merupakan reaktor riset terbesar di Asia Tenggara dengan daya termal 30 MW yang terletak di Kawasan Nuklir Serpong Tangerang Selatan - Banten. RSG-GAS termasuk jenis reaktor kolam (*pool type*) dengan pendingin berupa air ringan dan telah beroperasi dengan selamat selama lebih dari 30 tahun. Selain untuk mendukung aspek keselamatan operasi dan manajemen bahan bakar dalam teras, pengamatan karakteristik inventori pada RSG-GAS juga berperan sebagai data awal penentuan dosis atau paparan radiasi dan dapat dikembangkan untuk keperluan analisis keselamatan radiasi lainnya seperti perhitungan tebal perisai radiasi dan pengaturan jam kerja bagi pekerja radiasi. Parameter yang mempengaruhi inventori antara lain : daya atau fluks, bahan bakar (material) dan waktu iradiasi (lama operasi reaktor). Reaktor ini menggunakan bahan bakar jenis uranium silisida yang sebelumnya menggunakan jenis bahan bakar uranium oksida dengan durasi lama operasi 5 hari. Penggunaan ORIGEN2 untuk analisis deplesi dan inventori pada reaktor berpendingin air ringan (LWR) telah banyak dilakukan. Ardani (2010) telah melakukan analisis aktivitas dan intensitas sumber gamma di reaktor PWR 1000 MWe[5] dan juga dengan metode yang sama diterapkan pada reaktor riset berbahan bakar uranium molibdenum[6]. Amir Hamzah dan Iman Kuntoro telah membuat desain konseptual perisai radiasi untuk reaktor riset 50 MWt yang disebut Reaktor Riset Inovatif (RRI) dengan berbekal data awal perhitungan kuat sumber dan inventori bahan radioaktif dalam teras reaktor yang beroperasi selama 20 hari tiap siklusnya[7]. Pada penelitian ini akan ditentukan karakteristik inventori RSG-GAS pada berbagai level daya termal reaktor dengan basis bahan bakar uranium silisida. Karakteristik yang diamati meliputi intensitas gamma, massa dan aktivitas pada kondisi konfigurasi teras terkini (teras 95).

## METODOLOGI

Kegiatan studi pengamatan karakteristik produk hasil fisi reaktor nuklir pada berbagai level daya termal berbasis reaktor RSG-GAS dilakukan dengan beberapa tahapan utama yaitu mempersiapkan data desain utama RSG-GAS sebagai data masukan (*input*) simulasi ORIGEN2, memverifikasi dan menjalankan program simulasi ORIGEN2, dan melakukan analisis karakteristik inventori berupa intensitas gamma, massa dan radioaktivitas.

### 1. Data Teknis RSG-GAS sebagai *input* ORIGEN

Studi pengamatan karakteristik inventori pada berbagai level daya dilakukan pada basis reaktor riset yang terletak di kawasan Puspipetek Serpong, yakni RSG-GAS. RSG-GAS menggunakan bahan bakar jenis uranium silisida dengan densitas uranium 2,96 g/cc. Data

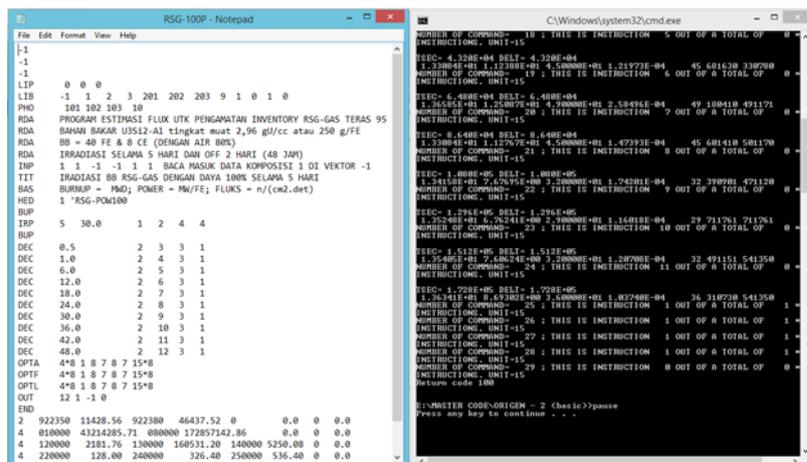
teknis yang diperlukan sebagai data masukan (*input*) dari program simulasi ORIGEN2 antara lain : daya termal, siklus operasi, komposisi massa dalam teras, waktu pengamatan (*cooling time*), *library* yang bersesuaian untuk RSG-GAS dan grup energi gamma yang digunakan. Kompilasi data-data teknis RSG-GAS ditunjukkan pada Tabel 1.

**Tabel 1. Data teknis RSG-GAS sebagai *input* ORIGEN2[8, 9]**

No.	Parameter	Keterangan
1	Daya termal	30 MWt
2	Jenis reaktor	Kolam ( <i>Pool type</i> )
3	Bahan bakar	Uranium silisida ( $U_3Si_2Al$ ) (40 <i>fuel element</i> , FE dan 8 <i>control element</i> , CE)
4	Densitas bahan bakar	2,96 g/cc
5	Dimensi bahan bakar (FE/CE)	77,1 × 81 × 600 mm
6	Pengkayaan U-235 ( <i>enrichment</i> )	19,75 ( <i>Low Enrichment Uranium</i> )
7	U-235 <i>fuel element loading</i>	250 g
8	U-235 <i>control element loading</i>	178,6 g
9	Sistem pendinginan	Konveksi paksa ( <i>forced convection</i> )
10	Moderator/pendingin	H <sub>2</sub> O
11	Reflektor	Be dan H <sub>2</sub> O
12	Waktu operasi	5 hari
13	Waktu pengamatan ( <i>cooling time</i> )	2 hari
14	Variasi perubahan daya	10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 & 100%
15	<i>Library</i>	Thermal.lib
16	Grup energi gamma	18 grup

## 2. Menjalankan Program Simulasi ORIGEN2

Setelah data masukan lengkap, maka *code* ORIGEN2 siap dijalankan (*running*). *Input* yang bersesuaian dijalankan dalam *thermal library* karena RSG-GAS tergolong reaktor thermal. Sebelum *input* tersebut dijalankan, dilakukan verifikasi penggunaan ORIGEN dengan kasus *benchmark* perhitungan inventori untuk reaktor daya jenis PWR (bagian lampiran). Berikut contoh tampilan penyiapan *input* dan *running* program ORIGEN2.



(a) penyiapan *input* (b) contoh *running* ORIGEN2

**Gambar 1. Tampilan penyiapan *input* dan *running* ORIGEN2**

## 3. Analisis Karakteristik Inventori : Intensitas gamma, Massa dan Radioaktivitas

Hasil *input* yang telah berhasil dijalankan, dianalisis beberapa karakteristiknya seperti intensitas foton gamma, massa dan aktivitasnya saat akhir siklus operasi (*End of Cycle*, EOC) dan selama waktu pengamatan (*maintenance*) pasca operasi. Penyortiran dilakukan terhadap file hasil keluaran (*output*) dari simulasi ORIGEN (berekstensi \*.OUT) sbb :

- a. Intensitas foton gamma pada bagian '18 GROUP PHOTON RELEASE RATES, PHOTONS/SECOND'
- b. Massa nuklida dan aktivitas pada bagian 'NUCLIDE TABLE : CONCENTRATIONS, GRAMS dan pada bagian 'RADIOACTIVITY, CURIES'

Penyortiran data berasal dari kategori produk fisi (*fission products*), produk aktivasi (*activation products*) maupun aktinida & anak luruhnya (*actinides & daughters*). Analisis karakteristik inventori dilakukan sebagai fungsi daya dengan variasi perubahan daya 10% hingga 100% (kelipatan 10%) dari daya termal sebesar 30 MWt.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Pengamatan Intensitas Sumber Gamma

Perbandingan intensitas sumber gamma pada akhir siklus (*End of Cycle, EOC*) sebagai fungsi level daya termal reaktor ditunjukkan pada Tabel 2 dan 3.

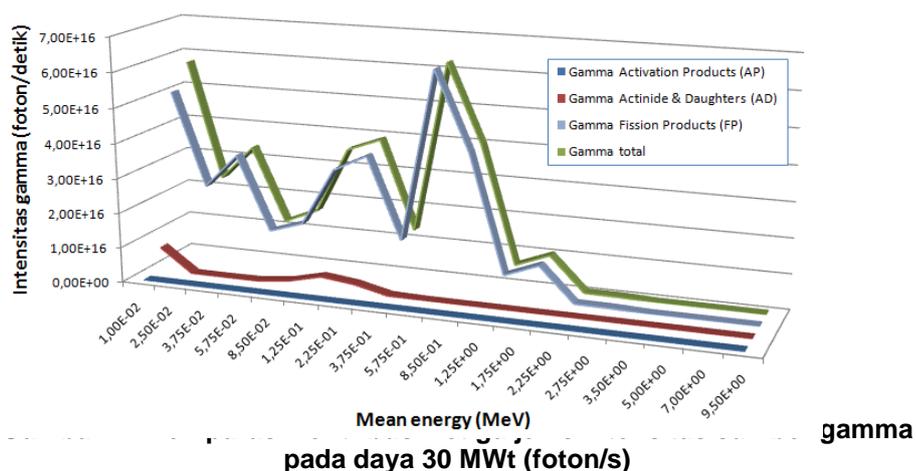
**Tabel 2. Intensitas sumber gamma RSG-GAS pada level daya 10%-50%**

<i>Mean E</i> (MeV)	Intensitas foton gamma saat EOC pada berbagai level daya, foton/detik				
	10%	20%	30%	40%	50%
1,00E-02	5,77E+15	1,15E+16	1,73E+16	2,30E+16	2,88E+16
2,50E-02	2,38E+15	4,76E+15	7,13E+15	9,51E+15	1,19E+16
3,75E-02	3,35E+15	6,70E+15	1,00E+16	1,34E+16	1,67E+16
5,75E-02	1,23E+15	2,46E+15	3,69E+15	4,92E+15	6,15E+15
8,50E-02	1,65E+15	3,29E+15	4,94E+15	6,58E+15	8,23E+15
1,25E-01	3,54E+15	7,08E+15	1,06E+16	1,41E+16	1,77E+16
2,25E-01	3,99E+15	7,91E+15	1,18E+16	1,57E+16	1,96E+16
3,75E-01	1,37E+15	2,73E+15	4,09E+15	5,45E+15	6,81E+15
5,75E-01	6,26E+15	1,25E+16	1,88E+16	2,50E+16	3,12E+16
8,50E-01	4,02E+15	8,04E+15	1,21E+16	1,61E+16	2,01E+16
1,25E+00	6,39E+14	1,28E+15	1,92E+15	2,55E+15	3,19E+15
1,75E+00	1,02E+15	2,04E+15	3,06E+15	4,08E+15	5,10E+15
2,25E+00	4,53E+13	9,07E+13	1,36E+14	1,81E+14	2,27E+14
2,75E+00	3,69E+13	7,39E+13	1,11E+14	1,48E+14	1,85E+14
3,50E+00	2,98E+11	5,96E+11	8,95E+11	1,19E+12	1,49E+12
5,00E+00	4,80E+07	9,58E+07	1,44E+08	1,91E+08	2,39E+08
7,00E+00	4,16E+00	4,16E+00	4,16E+00	4,17E+00	4,17E+00
9,50E+00	4,78E-01	4,78E-01	4,78E-01	4,79E-01	4,79E-01
<b>Total</b>	<b>3,53E+16</b>	<b>7,05E+16</b>	<b>1,06E+17</b>	<b>1,41E+17</b>	<b>1,76E+17</b>

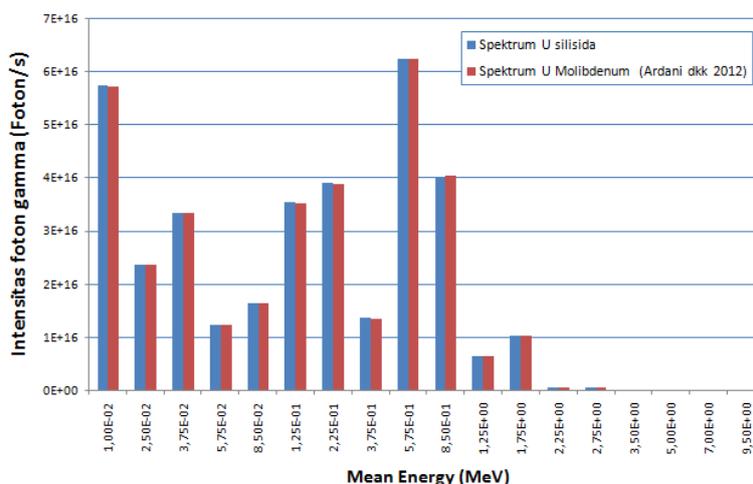
**Tabel 3. Intensitas sumber gamma RSG-GAS pada level daya 60%-100%**

<i>Mean E</i> (MeV)	Intensitas foton gamma saat EOC pada berbagai level daya, foton/detik				
	60%	70%	80%	90%	100%
1,00E-02	3,45E+16	4,03E+16	4,60E+16	5,17E+16	5,75E+16
2,50E-02	1,42E+16	1,66E+16	1,90E+16	2,14E+16	2,37E+16
3,75E-02	2,01E+16	2,34E+16	2,68E+16	3,01E+16	3,34E+16
5,75E-02	7,37E+15	8,60E+15	9,83E+15	1,11E+16	1,23E+16
8,50E-02	9,87E+15	1,15E+16	1,32E+16	1,48E+16	1,64E+16
1,25E-01	2,12E+16	2,48E+16	2,83E+16	3,18E+16	3,54E+16
2,25E-01	2,35E+16	2,74E+16	3,13E+16	3,52E+16	3,90E+16
3,75E-01	8,16E+15	9,52E+15	1,09E+16	1,22E+16	1,36E+16
5,75E-01	3,75E+16	4,37E+16	5,00E+16	5,62E+16	6,24E+16
8,50E-01	2,41E+16	2,81E+16	3,21E+16	3,61E+16	4,01E+16
1,25E+00	3,83E+15	4,47E+15	5,10E+15	5,74E+15	6,37E+15
1,75E+00	6,12E+15	7,14E+15	8,16E+15	9,19E+15	1,02E+16
2,25E+00	2,72E+14	3,17E+14	3,63E+14	4,08E+14	4,53E+14
2,75E+00	2,22E+14	2,59E+14	2,96E+14	3,33E+14	3,70E+14
3,50E+00	1,79E+12	2,09E+12	2,39E+12	2,69E+12	2,98E+12
5,00E+00	2,87E+08	3,34E+08	3,82E+08	4,29E+08	4,76E+08
7,00E+00	4,18E+00	4,18E+00	4,19E+00	4,19E+00	4,20E+00
9,50E+00	4,80E-01	4,80E-01	4,81E-01	4,81E-01	4,82E-01
<b>Total</b>	<b>2,11E+17</b>	<b>2,46E+17</b>	<b>2,81E+17</b>	<b>3,16E+17</b>	<b>3,51E+17</b>

Sesuai hasil yang diperoleh pada tabel di atas, maka diperoleh informasi bahwa pada setiap level *mean energy* (18 grup), intensitas sumber gamma semakin naik sebanding dengan kenaikan daya termal reaktor yang divariasikan mulai level daya 10% hingga 100% dengan daya maksimal 30 MWt. Kenaikan level daya ditentukan sebesar 10% untuk mempermudah pengamatan karakteristik inventori hasil fisi. Intensitas sumber gamma yang dihasilkan merupakan hasil akumulasi dari foton gamma peluruhan yang berasal dari produk fisi (*fission products*), produk aktivasi (*activation products*) dan aktinida & anak luruhnya (*actinides & daughters*). Apabila diamati lebih lanjut, kontribusi foton gamma dari produk fisi lebih besar bila dibandingkan dengan kategori lainnya. Hal ini bersesuaian dengan teorema yang menyebutkan bahwa prosentase hasil reaksi fisi sebagian besar (~81%) berupa fragmen produk fisi [10]. Hal itu juga menunjukkan bahwa gamma hasil fisi mendominasi, baik gamma hasil fisi umur pendek (reaktor operasi) ataupun gamma hasil fisi umur paro panjang memberikan kontribusi utama selama siklus operasi 5 hari dan *shutdown* selama 2 hari. Grafik dibawah ini menunjukkan komparasi kontribusi ketiga jenis intensitas gamma pada level daya 100% (30 MWt).



Pada *mean energy rendah* (dibawah 1 MeV), intensitas sumber gamma dari kategori FP berada pada rentang nilai  $10^{15}$ - $10^{16}$  foton/detik, sedangkan dari kategori AP dan AD bernilai jauh dibawahnya, sehingga dapat dijustifikasi bahwa foton gamma dari kategori FP mencerminkan foton gamma total yang dihasilkan. Pola spektrum gamma yang dihasilkan dari reaktor berbahan bakar uranium silisida di atas ternyata identik dan memiliki kemiripan pola spektrum dengan reaktor sejenis dengan bahan bakar uranium molibdenum pada daya yang sama[6]. Hal tersebut ditunjukkan pada Gambar 3.



**Gambar 3. Komparasi pola spektrum foton gamma reaktor riset berbasis U-silisida dan U-molibdenum**

## 2. Pengamatan Massa dan Aktivitas Inventori

Perubahan produk hasil fisi atau inventori massa penyusun material dalam teras reaktor dilakukan dengan mengamati massa di awal siklus (BOC) dan di akhir siklus (EOC) setelah proses irradiasi di dalam teras reaktor. Perubahan massa penyusun material dalam teras reaktor yang terdiri dari bahan bakar dan air pendingin ditunjukkan dalam Tabel 4 dan 5.

**Tabel 4. Perubahan massa inventori RSG-GAS pada level daya 10%-50%**

Kategori	Unsur	BOC	Massa akhir, EOC (gram)				
		(gram)	10%	20%	30%	40%	50%
Bahan Fisil	U-235	1,14E+04	1,14E+04	1,14E+04	1,14E+04	1,14E+04	1,13E+04
		(Perubahan massa, %)	(-0,17)	(-0,35)	(-0,52)	(-0,61)	(-0,79)
	U-238	4,64E+04	4,64E+04	4,64E+04	4,64E+04	4,64E+04	4,64E+04
Bahan non fisil	H	4,32E+07	4,32E+07	4,32E+07	4,32E+07	4,32E+07	4,32E+07
	O	1,73E+08	1,73E+08	1,73E+08	1,73E+08	1,73E+08	1,73E+08
	Mg	2,18E+03	2,18E+03	2,18E+03	2,18E+03	2,18E+03	2,18E+03
	Al	1,61E+05	1,61E+05	1,61E+05	1,61E+05	1,61E+05	1,61E+05
	Si	5,25E+03	5,25E+03	5,25E+03	5,25E+03	5,25E+03	5,25E+03
	Ti	1,28E+02	1,28E+02	1,28E+02	1,28E+02	1,28E+02	1,28E+02
	Cr	3,26E+02	3,26E+02	3,26E+02	3,26E+02	3,26E+02	3,26E+02
	Mn	5,36E+02	5,36E+02	5,36E+02	5,36E+02	5,36E+02	5,36E+02
	Fe	5,50E+02	5,50E+02	5,50E+02	5,50E+02	5,50E+02	5,50E+02
	Cu	3,12E+02	3,12E+02	3,12E+02	3,12E+02	3,12E+02	3,12E+02
	Zn	2,56E+02	2,56E+02	2,56E+02	2,56E+02	2,56E+02	2,56E+02
Racun Neutron	Xe-135		4,19E-03	7,80E-03	1,12E-02	1,45E-02	1,78E-02
	Sm-149		7,64E-02	1,49E-01	2,19E-01	2,85E-01	3,48E-01

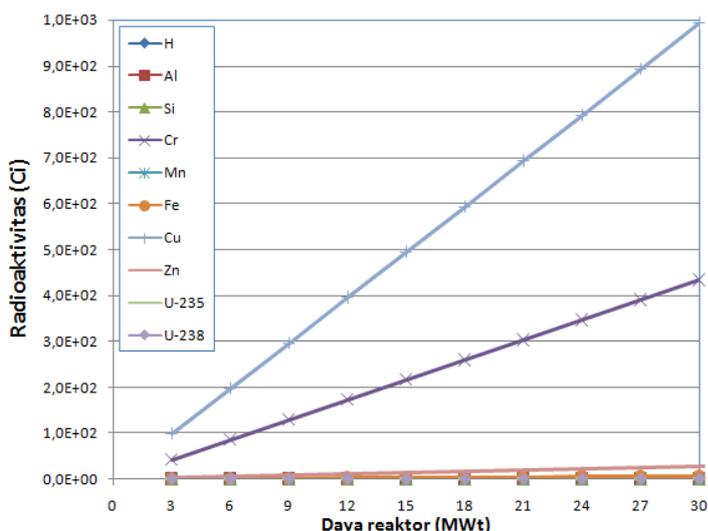
**Tabel 5. Perubahan massa inventori RSG-GAS pada level daya 60%-100%**

Kategori	Unsur	BOC	Massa akhir, EOC (gram)				
		(gram)	60%	70%	80%	90%	100%
Bahan Fisil	U-235	1,14E+04	1,13E+04	1,13E+04	1,13E+04	1,13E+04	1,125E+04
		(Perubahan massa, %)	(-0,96)	(-1,14)	(-1,31)	(-1,49)	(-1,57)
	U-238	4,64E+04	4,64E+04	4,64E+04	4,64E+04	4,64E+04	4,643E+04
Bahan non fisil	H	4,32E+07	4,32E+07	4,32E+07	4,32E+07	4,32E+07	4,321E+07
	O	1,73E+08	1,73E+08	1,73E+08	1,73E+08	1,73E+08	1,729E+08
	Mg	2,18E+03	2,18E+03	2,18E+03	2,18E+03	2,18E+03	2,182E+03
	Al	1,61E+05	1,61E+05	1,61E+05	1,61E+05	1,61E+05	1,605E+05
	Si	5,25E+03	5,25E+03	5,25E+03	5,25E+03	5,25E+03	5,251E+03
	Ti	1,28E+02	1,28E+02	1,28E+02	1,28E+02	1,28E+02	1,280E+02
	Cr	3,26E+02	3,26E+02	3,26E+02	3,26E+02	3,26E+02	3,264E+02
	Mn	5,36E+02	5,36E+02	5,36E+02	5,36E+02	5,36E+02	5,362E+02
	Fe	5,50E+02	5,50E+02	5,50E+02	5,50E+02	5,50E+02	5,498E+02
	Cu	3,12E+02	3,12E+02	3,12E+02	3,12E+02	3,12E+02	3,120E+02
	Zn	2,56E+02	2,56E+02	2,56E+02	2,56E+02	2,56E+02	2,556E+02
Racun Neutron	Xe-135		2,11E-02	2,43E-02	2,75E-02	3,07E-02	3,387E-02
	Sm-149		4,09E-01	4,67E-01	5,23E-01	5,77E-01	6,281E-01

Massa material yang diamati dibedakan dalam tiga kategori, yakni bahan fisil dan fertil (U-235 dan U-238), bahan non fisil dan racun neutron yang dihasilkan dalam bentuk Xe-135 dan Sm-149. Uranium dengan nomor massa 235 (U-235) sebagai bahan fisil mengalami

perubahan massa seiring dengan kenaikan daya. Jumlah U-235 terus menurun sebanding dengan kenaikan daya termal reaktor. Penurunan untuk tiap siklus mencapai hampir 2% tiap siklusnya pada daya maksimal 100%. Nilai ini didefinisikan sebagai fraksi bakar (*burn up*) yang mencerminkan perbandingan massa U-235 pada kondisi akhir (EOC) dengan kondisi awal (BOC) sebagai bahan bakar. Mengingat masih cukup banyaknya persentase U-235 akhir untuk tiap siklusnya, maka bahan bakar U-235 dapat digunakan berulang kali. Bahkan pada evaluasi manajemen teras RSG-GAS berbasis perhitungan fraksi bakar yang dilakukan oleh Suparlina, L., dan Susilo, J. (2009), disebutkan bahan bakar RSG-GAS dapat digunakan pada tingkat fraksi bakar sekitar 49% dan akan *discharge* dari reaktor pada tingkat bakar mencapai 56%[11]. Direncanakan tiap bahan bakar digunakan hingga 10x siklus sesuai jadwal operasi yang telah ditentukan. Lain halnya dengan massa U-238 yang relatif tetap perubahan massanya tiap kenaikan daya. Hal tersebut mengingat U-238 bukan merupakan bahan fisil yang langsung 'terbakar' atau mengalami reaksi fisi, tetapi berperan sebagai bahan yang akan menghasilkan bahan fisil lain seperti Pu-239 untuk reaksi fisi selanjutnya.

Pengamatan selanjutnya adalah terhadap massa bahan aktivasi atau bahan yang inti atomnya bereaksi dengan neutron atau radiasi gamma dan tidak mengalami reaksi pembelahan (fisi). Bahan aktivasi tersebut merupakan unsur-unsur penyusun yang berasal dari material matriks bahan bakar, kelongsong (*cladding*) dan air sebagai pendingin reaktor. Dikarenakan tidak mengalami reaksi pembelahan, maka massa yang dihasilkan setelah siklus operasi tetap, dan perubahan terjadi pada aktivitas dari isotop yang dihasilkan dengan tren naik, terutama pada nuklida Cu dan Cr. Hal ini dapat dilihat pada perubahan radioaktivitas pada grafik berikut :



Gambar 4. Perubahan radioaktivitas (Ci) sebagai fungsi daya reaktor

Pengamatan lainnya berupa isotop dari Xenon dan Samarium yang berperan sebagai 'racun neutron' karena memiliki tampang lintang serapan yang besar terhadap neutron. Dari Tabel 3 di atas diperoleh informasi bahwa massa Xe-135 dan Sm-149 yang dihasilkan naik seiring kenaikan daya reaktor. Xe-135 dan Sm-149 merupakan termasuk kategori *fission products* yang senantiasa dihasilkan sebagai hasil reaksi fisi, hal ini dapat diverifikasi dari data hasil keluaran (*output*) *running* ORIGEN pada list kategori *fission products*. Semakin besar daya reaktor, semakin banyak produksi racun reaktor yang dihasilkan, sehingga perlu dioptimasi misalnya tidak mengoperasikan pada level daya maksimum. Adanya peningkatan jumlah racun reaktor mengakibatkan reaktor tidak dapat langsung dioperasikan setelah reaktor *shutdown*. Berdasarkan informasi dari operator, diperlukan waktu minimal sekitar 30 jam untuk mulai operasi lagi. Berdasarkan optimasi dan pengalaman, disepakati 48 jam atau 2 hari waktu yang diperlukan untuk operasi kembali. Pada praktek operasional RSG-GAS, untuk alasan efisiensi reaktor dioperasikan tidak pada daya maksimalnya, namun hanya pada level daya 50% (15 MWt). Sukmana dkk (2010) tingkat radioaktivitas dari inventori hasil reaksi fisi merupakan salah satu kontributor penting

pada penentuan *source term* pada skenario terjadinya lepasan radioaktif pada RSG-GAS pada daya 15 MWt[12].

Salah satu cara yang dapat ditempuh untuk mengurangi jumlah dan tingkat radioaktivitas radionuklida berbahaya hasil reaksi fisi adalah dengan cara 'membakar' radionuklida tersebut melalui prinsip transmudasi. Proses pembakaran tersebut selain bertujuan untuk mentransmutasikan produk fisi atau aktinida minor umur panjang juga bertujuan mengurangi tingkat radiotoksistas, menghasilkan bahan fisil dan fertil dan sejumlah energi untuk aplikasi pada industri. Proses pembakaran umumnya dilakukan dalam suatu reaktor atau fasilitas *Accelerator Driven Transmutation System* atau lebih lazim disebut *Accelerator Driven System* (ADS). Kajian tentang fasilitas ADS telah banyak dilakukan dengan baik berbasis reaktor daya ataupun reaktor riset. Beberapa negara seperti Jepang, Amerika Serikat, Tiongkok, dan negara-negara Eropa telah giat melakukan riset dan membuat *prototype* desain fasilitas ADS[13]. Di Indonesia sendiri, riset desain konseptual fasilitas ADS telah dilakukan baik berbasis reaktor daya[14] ataupun reaktor riset yang menggunakan *tool* ORIGEN2 untuk rancangan konseptual fasilitas ADS dari limbah PLTN berbasis reaktor riset di Yogyakarta[15,16].

## KESIMPULAN

Dari hasil dan pembahasan dapat disimpulkan bahwa pada setiap level *mean energy*, intensitas sumber gamma semakin naik sebanding dengan kenaikan daya reaktor dengan kontribusi terbesar dari intensitas foton gamma berasal dari kategori *Fission Products*, kontribusi lainnya berasal dari kategori *Activation Products* dan *Actinides & Daughters*. Pola spektrum gamma yang dihasilkan identik dengan pola spektrum reaktor sejenis dengan bahan bakar molibdenum pada daya yang sama. Kenaikan daya menyebabkan penurunan massa U-235 sebagai bahan fisil dan hampir tidak menyebabkan perubahan massa U-238. Kenaikan daya mengakibatkan massa pengotor reaktor (racun neutron : Xe-135 & Sm-149) semakin bertambah. Radioaktivitas U-235 & U-238 relatif tetap sebagai fungsi waktu sedangkan radioaktivitas bahan non fisil memiliki tren semakin naik

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Rahmat Triharto, MT dan Nazly Kurniawan, ST yang telah membantu ketersediaan data teknis terkait RSG-GAS. Penulis juga mengucapkan terimakasih kepada Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) yang telah memberikan beasiswa selama menempuh pendidikan doktoral di Fisika ITB.

## DAFTAR PUSTAKA

1. KELBER C., "The Radiological Source Term of Nuclear Power Reactors", Nuclear Safety, Vol 27, January-March (1986).
2. RSICC COMPUTER CODE CCC-371 ORIGEN, data diperoleh melalui situs internet: <https://rsicc.ornl.gov/codes/ccc/ccc3/ccc-371.html>  
Diakses pada tanggal 25 Maret 2018.
3. GAULD I.C., BOWMAN S.M., HORWEDEL, J.E., "ORIGEN-ARP: Automatic Rapid Processing for Spent Fuel Depletion, Decay and Source Term Analysis", ORNL/TM-2005/39, Revision 5.1, Vol. I, Book 2, Sect. D1, November (2006).
4. RSIC, "ORIGEN 2.1 Isotope Generation and Depletion Code – Matrix Exponential Method", Computer Code Collection CCC-371, August 1 (1991).
5. ARDANI, "Analisis Aktivitas Sumber Radiasi dan Intensitas Sinar Gamma di Teras Reaktor PWR 1000 MWe", J. Nucl. Reactor Tech. Tri Dasa Mega, **12**, 67-74 (2010).
6. ARDANI dan ROHANDA A, "Penentuan Intensitas Sumber Gamma Di Teras Reaktor Riset berbahan Bakar Uranium Molibdenum", Jurnal Sigma Epsilon, **16** No. 3-4, 111-121 (2012).
7. HAMZAH A. dan KUNTORO I., "Desain Konseptual Perisai Radiasi Reaktor RRI-50", J. Nucl. Reactor Tech. Tri Dasa Mega **17**, 99-110 (2015).
8. BATAN, "Multipurpose Reactor G.A. Siwabessy Safety Analysis Report" Rev. 10.1. (2011).

9. HONG L.P., dan SEMBIRING T.M., "Development of new ORIGEN2 data library sets for research reactors with light water cooled oxide and silicide LEU (20 w/o) fuels based on JENDL-3.3 nuclear data", *Nuclear Engineering and Design* **262**, 52– 62 (2013).
10. LAMARSH J.R., "Introduction to Nuclear Reactor Theory", Addison-Wesley Publishing Co., USA, 104 (2002).
11. SUPARLINA L., dan SUSILO J., "Evaluasi Manajemen Teras Reaktor RSG-GAS Berdasarkan Perhitungan Fraksi Bakar ", Prosiding PPI - PDIPTN Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan - BATAN 14 Juli, Hal. 131-136, Yogyakarta (2009).
12. SUKMANA J., KORUA J.A., SUWARTO S. "Analisis Kuantitatif Source-Term RSG-GAS pada Operasi Daya 15 MW, Buletin Pengelolaan Reaktor Nuklir, **7**, 39 - 50 (2010).
13. IAEA, "Status of Accelerator Driven Systems Research and Technology Development", IAEA TECDOC-1766 (2015).
14. MARSODI, K. NISHIHARA, Z. SUUD "Design of Full Scale Accelerator Driven System (ADS) for Transmuting High Level Waste of Ma/Pu", *Jurnal Atom Indonesia*, **34**, 89-101 (2008).
15. SYARIP, SUTONDO T., EDI TRIYONO BS, "Rancangan Konseptual Reaktor Subkritik untuk Kajian Transmutasi Limbah PLTN berbasis Reaktor Kartini", *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir* **15**, 139-148 (2013).
16. SUTONDO T., "Kajian Awal Aspek Neutronik dari Rancangan Konseptual Fasilitas ADS berbasis Reaktor Kartini", Prosiding Pertemuan dan Presentasi ilmiah Teknologi Akselerator dan Aplikasinya 13 Januari, Hal. 157-164, Yogyakarta (2012).

**KELOMPOK D**

---

---

**MATERIAL SAINS**

Halanan ini sengaja dikosongkan

## TEKNIK PEMBUATAN BAJA ODS Fe 25Cr 0.5 ZrO<sub>2</sub> MENGGUNAKAN METODA ARC PLASMA SINTERING

Rohmad Salam, Arbi Dimiyati, Sumaryo

Pusat Sains dan Teknologi Bahan Maju, PSTBM-BATAN, Puspiptek, Indonesia

### Abstrak

Baja paduan ODS (*oxide dispersion strengthened alloy*) dipandang sebagai baja masa depan untuk aplikasi dalam teknik nuklir dan pembangkit energi pada umumnya karena sifatnya yang tahan terhadap lingkungan temperatur tinggi. Baja ODS saat ini diproduksi melalui proses metalurgi serbuk dan proses konsolidasi sintering dalam sebuah oven vakum yang cukup rumit dan mahal. Pada penelitian ini dilakukan pembuatan baja temperatur tinggi ODS berbasis FeCr menggunakan metoda baru dengan *Arc Plasma Sintering (APS)* yang telah dikembangkan di PSTBM-BATAN. Baja ini dibuat dari bahan dasar serbuk Fe, Cr dan ZrO<sub>2</sub> dengan komposisi 74,5% Fe, 25% Cr, 0,5% ZrO<sub>2</sub>. Serbuk Cr sebelumnya dilakukan *milling* pendahuluan selama 5 jam untuk mencapai ukuran yang sama dengan serbuk Fe. Kemudian serbuk Fe dan Cr dicampur dan di *milling* menggunakan *high energy milling (HEM)* selama 8 jam lalu ditekan pada tekanan 20 ton. Hasil tekan optimal dicapai dengan vibrasi sesaat sebelum penekanan. Sampel kemudian disintering dalam APS selama 16 menit dengan arus 80 A. Dari penelitian ini diperoleh hasil bahwa metoda APS telah menghasilkan sampel yang cukup padat, jumlah porositas rendah dan fasa ideal sesuai dengan diagram fasa. Hasil *mapping* EDX menunjukkan sebaran elemen yang relatif homogen dengan sedikit konsentrasi Cr di beberapa posisi.

**Kata Kunci:** Paduan ODS Fe25Cr0.5ZrO<sub>2</sub>, Metalografi, SEM, EDX, APS.

### Abstract

alloy steel ODS (*oxide dispersion strengthened alloy*) is seen as a future steel for applications in nuclear engineering and energy generation in general because of its resistance to high temperature environments. ODS steel is currently produced through powder metallurgy and the process of consolidating the sintering in a vacuum oven which is quite complicated and expensive. In this study, high temperature steelmaking was made using FeCr-based ODS using a new method with Plasma Sintering Arc (APS) which was developed in PSTBM-BATAN. This steel is made from basic ingredients of Fe, Cr and ZrO<sub>2</sub> powder with a composition of 74.5% Fe, 25% Cr, 0.5% ZrO<sub>2</sub> [5]. Cr powder was previously milled for 5 hours to reach the same size as Fe powder. Then Fe and Cr powder is mixed and milled using high energy milling (HEM) for 8 hours then pressed at a pressure of 20 tons. Optimal press results are achieved by vibration just before pressing. The samples were then sintered in APS for 16 minutes with a current of 80 A. From this study, the results showed that the APS method had produced a fairly dense sample, the amount of low porosity and ideal phase in accordance with the phase diagram. EDX mapping results show the distribution of elements that are relatively homogeneous with a little Cr concentration in several positions.

**Keywords:** Alloy ODS Fe 25Cr 0.5 ZrO<sub>2</sub>, Metallography, SEM, EDX, APS.

### PENDAHULUAN

Salah satu teknik produksi baja paduan tahan panas dengan dispersi partikel oksida seperti baja paduan ODS yang *trend* di dunia saat ini adalah teknik metalurgi serbuk dengan *sintering*. Keunggulan teknik ini terutama adalah karena komposisi kimia bahan dapat ditentukan dengan pasti untuk mendapatkan fasa yang dikehendaki dan sebaran bahan campuran dapat dibuat merata serta homogen sejak awal preparasi. Akan tetapi produksi

baja dengan *sintering* memerlukan energi dan waktu yang lama. Hal ini menimbulkan ongkos yang mahal [1].

Perkembangan cukup signifikan telah terjadi setelah penemuan teknologi *sintering* yang dikenal dengan nama *Spark Plasma Sintering (SPS)* di tahun 80an, meskipun masih dalam skala laboratorium *eksperimental*. Waktu yang diperlukan untuk sebuah sampel sekitar 30 menit hingga beberapa jam. Penelitian menggunakan teknik SPS telah banyak dipublikasi secara internasional. Hasil *sintering* dengan SPS menunjukkan homogenitas yang baik, Pada temperatur antara 900 hingga 1200°C [2]. Akan tetapi teknik SPS hanya dapat memproses sampel dalam bentuk koin dan investasi pengadaannya cukup mahal [2].

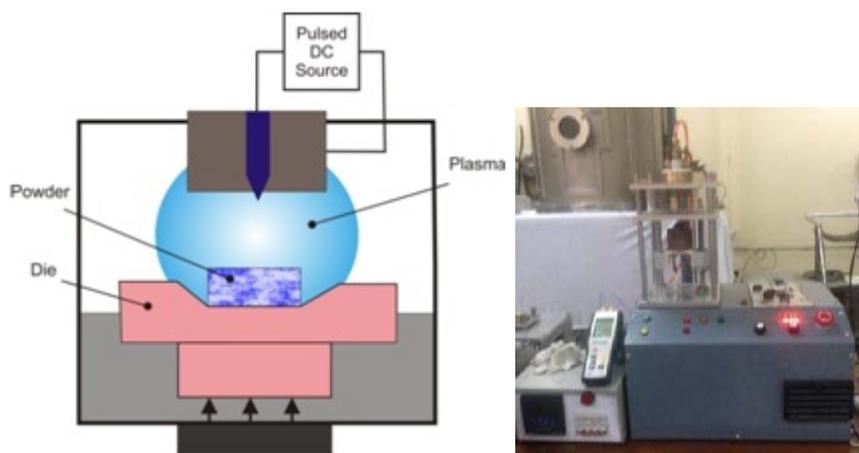
Alternatif terbaru sejak 4 tahun terakhir adalah pengembangan alat *sintering* berbasis plasma sebagai hasil kolaborasi BATAN, Universitas Surya, UI dan industri manufaktur nasional Elindo yang didukung oleh KemenristekDikti dalam program INSINAS yang dikenal dengan *Arc Plasma Sintering (APS)*. APS menggunakan busur listrik DC untuk membangkitkan plasma dengan temperatur hingga lebih dari 3000 °C. APS pada awalnya didisain untuk sintesa material temperatur tinggi ODS yang sulit dilakukan menggunakan teknik pelelehan dan *sintering* konvensional. Selain untuk *sintering*, alat ini dapat di gunakan untuk pengerasan permukaan suatu bahan serta dapat juga digunakan untuk melebur suatu bahan.

Pada penelitian ini dilakukan pengembangan teknik produksi baja paduan ODS FeCrZrO<sub>2</sub> dengan komposisi 74.5% Fe, 25% Cr, 0.5% ZrO<sub>2</sub>, dengan penekanan pada proses preparasi sampel, pengamatan struktur detail dan sifat mekanik bahan. Selain menggunakan teknik metalografi, penelitian ini didukung oleh pengukuran menggunakan XRD dan SEM/EDX, yang ditujukan terutama untuk validasi fasa.

## METODA PENELITIAN

### 1. Alat Arc Plasma Sintering (APS)

Secara prinsip APS adalah teknologi *sintering* baru dengan pemanfaatan panas plasma yang ditimbulkan oleh hasil dari beda potensial antara anoda dan katoda. Kelebihan alat ini dibanding teknik lain seperti SPS atau FPS (*Fast Plasma Sintering*) adalah kebutuhan listrik yang kecil (kurang dari 1200 Watt) dan tidak memerlukan keadaan vakum sehingga APS dapat bekerja tanpa ruang sampel.



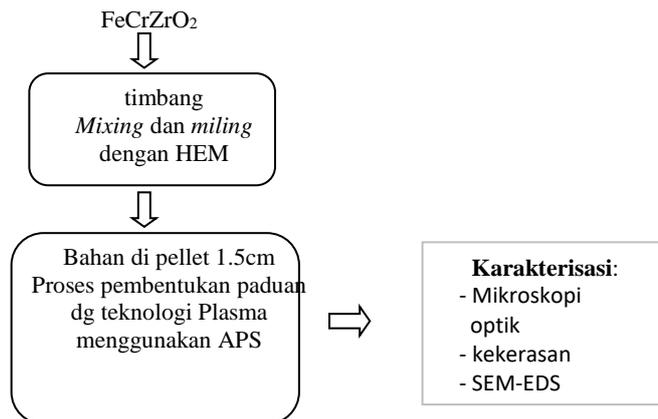
Gambar 1. Skema teknis dan alat APS.

Komponen utama dari peralatan APS (*Arc Plasma Sintering*) diperlihatkan pada Gambar 1 yang terdiri dari: nosel plasma berpendingin (*torch*), sumber tegangan DC, gas Argon, tempat sampel (*sample stage*). Gas argon dialirkan melalui sebuah *torch*, didalam *torch* terjadi lompatan tegangan DC yang dihasilkan dari transformasi tegangan AC 220 V dengan arus sinus menjadi tegangan searah 12V dengan arus kotak pada frekuensi tinggi. Di lingkungan busur yang terjadi antar dua kutub di dalam nosel, sebagian gas argon berubah menjadi plasma. Bahan yang akan di *sintering* berada di dekat *torch* (sesuai gambar), *torch*

terdiri dari 3 bagian, bagian depan sebagai katoda dan tengah sebagai isolator antara bagian depan dan belakang sebagai anoda, di dalam *torch* terjadi lompatan tegangan tinggi yang dihasilkan oleh sumber tegangan tinggi, disebabkan terdapat beda potensial antara anoda dan katoda. Api yang dihasilkan diarahkan ke bahan uji sehingga terjadi pengerasan permukaan. Sistem control berfungsi sebagai penaik dan penurun sampel serta untuk pengoperasian *Arc Plasma Sintering* tersebut.

## 2. Preparasi bahan

Keseluruhan kegiatan penelitian ini ditunjukkan secara skematis pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram alir teknik pembuatan baja temperatur tinggi paduan ODS.[4]

Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah campuran serbuk Fe-Cr-ZrO<sub>2</sub>. Bahan ini merupakan serbuk standar dari fabrikasi dengan tingkat kemurnian di atas 99%. Komposisi kimia paduan material ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi kimia campuran bahan.

No	Nama Sampel	Fe [% berat]	Cr [% berat]	ZrO <sub>2</sub> [% berat]
1	FeCrZrO <sub>3</sub>	74,5	25	0,5

Bahan paduan dipersiapkan sebagai berikut: pertama bahan Fe, Cr, ZrO<sub>2</sub> ditimbang hingga akurasi 0,005 gr sebanyak total 36 gr, kemudian dilakukan pencampuran dan pengecilan butiran dengan cara *mixing* dan *milling* dengan menggunakan *High Energy Milling* (HEM), dapat dilihat pada Gambar 3. Untuk mendapatkan paduan yang optimum, serbuk Cr di *milling* selama 5 jam terlebih dahulu, lalu seluruh bahan di *milling* selama 8 jam.



Gambar 3. High Energy Milling (HEM) produksi LIPI yang digunakan dalam penelitian ini.

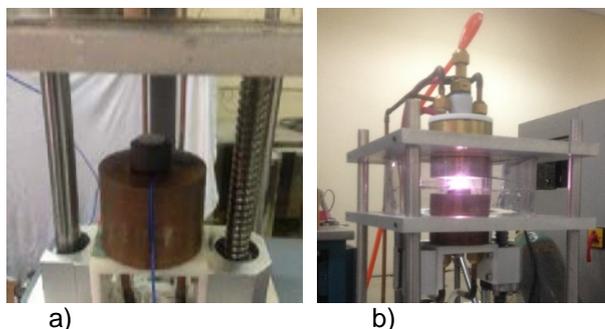
Campuran kemudian dikompaksi di dalam mesin pres dengan beban tekan 20 ton. Pemilihan tekanan hingga 20 ton berdasarkan hasil penelitian sebelumnya yang didapatkan bahwa hasil kompaksi yang paling bagus adalah tekanan 20 ton. Dyes yang digunakan adalah berdiameter 15 mm dan waktu getar selama 2 menit dan waktu tekan selama 3 menit untuk menghasilkan bahan berbentuk koin (Gambar 4).



Gambar 4. (a) Alat vibrasi campuran bahan sebelum proses pengepresan buatan PSTBM-BATAN dan (b) Sampel baru setelah pengepresan.

### 3. Proses sintering

Selanjutnya sampel dilakukan *sintering* secara langsung yaitu tanpa di tutup dengan grafit di dalam APS selama 16 menit pada jarak kerja (WD) 15 mm terhadap nosel plasma dengan arus 80 A dengan aliran gas argon 10 liter/menit, seperti ditunjukkan pada Gambar 5. Proses *sintering* dilakukan secara semi otomatis dimana sampel dipapar oleh plasma dalam interval 10 detik dengan waktu *delay* 2 detik. Satu periode pemaparan terjadi selama 4 menit sehingga sampel secara total diproses sebanyak 4 periode. Moda proses seperti ini disebut moda *alternate*, dimana sampel mengalami pemanasan dan waktu relaksasi untuk menghindari terjadinya tegangan berlebihan karena syok panas.



Gambar 5. Alat APS (*Arc Plasma Sintering*) (a) tempat sampel (b) Proses *sintering*.

### 4. Karakterisasi

Sebelum dilakukan karakterisasi metalografi menggunakan mikroskop optik dan secara mikroskopi menggunakan SEM, sampel disiapkan terlebih dahulu dengan cara dipoles menggunakan amplas dengan ukuran dari 400, 800, 1000 sampai 3000, setelah itu di etsa menggunakan larutan Kaling. Uji kekerasan dilakukan menggunakan alat pengukuran kekerasan mikro Vickers dengan beban 200 g, kemudian dilakukan pengamatan sampel secara metalografi menggunakan mikroskop optik dan SEM.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

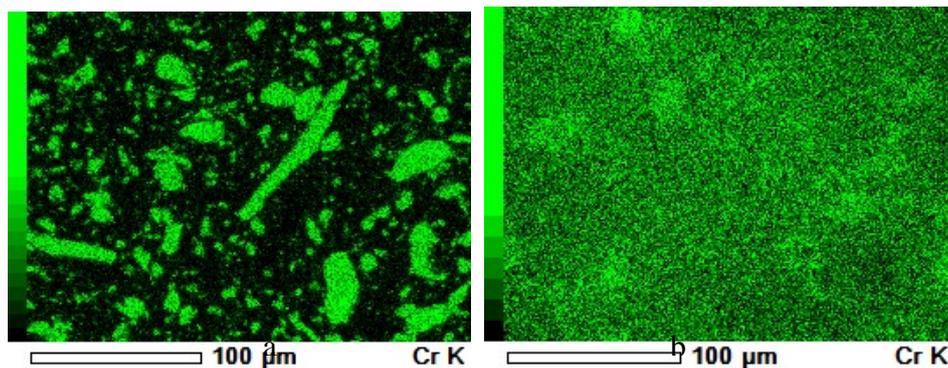
Hasil pemotretan mikroskop optik ditunjukkan pada Gambar 6. Dimana sampel a adalah sampel yang di *sintering* selama 4 menit, sampel b selama 16 menit dan sampel c selama 22 menit, menunjukkan perubahan struktur mikro yang signifikan. Pada sampel a masih terlihat partikel serbuk Cr dengan jelas sedangkan serbuk Fe menunjukkan sebagian

fasa Fe. Sampel b menunjukkan fasa FeCr yang relatif homogen yang menunjukkan pembentukan fasa feritik FeCr sesuai diagram fasa. Hanya sebagian kecil masih terlihat zona interdifusi Fe-Cr. Setelah 22 menit hampir seluruh sampel terdiri dari fasa Fe-Cr dengan porositas sisa yang sudah sangat berkurang.



Gambar 5. Citra hasil mikroskop optik pada sampel setelah *sintering* dalam APS a) 4 menit b) 16 menit dan c) 22 menit.

Hasil analisa pemetaan SEM EDX seperti ditunjukkan pada Gambar 6, memberikan konfirmasi proses pembentukan fasa FeCr yang terbentuk selama paparan dengan plasma setelah 4 dan 22 menit. Pada Gambar 6 terlihat perubahan bahan Cr setelah 16 dan 22 menit. unsur Cr tersebar di dalam matriks melalui proses interdifusi pada keadaan padat selama proses *sintering* di dalam APS.



Gambar 6. Pemetaan SEM unsur Cr pada sampel setelah *sintering* dengan APS selama a) 16 dan b) 22 menit.

Dari hasil uji kekerasan didapatkan bahwa kekerasan sampel setelah *sintering* 16 menit dengan HV rata-rata 116,3 dan sampel b setelah 16 menit dengan HV rata-rata 142,833 dengan selisih perbedaan 26,533 HV.

Tabel 2. Hasil pengukuran kekerasan metoda Vickers.

Sampel	APS	Titik Pengukuran	HV	HV rata-rata
1	80 A, 16 menit	1	137,6	116,3
		2	119,3	
		3	92,0	
2	80 A, 22 menit	1	135,7	142,833
		2	132,4	
		3	160,4	

## KESIMPULAN

Pabrikasi baja ODS paduan FeCrZrO<sub>2</sub> dengan komposisi 74,5% Fe, 25% Cr, 0,5% ZrO<sub>2</sub> berbasis Fe<sub>25</sub>Cr telah berhasil di buat dan disiapkan serta dianalisis menggunakan mikroskop optik dan SEM. Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa sampel setelah *sintering* dengan APS dengan selama 16 menit telah menunjukkan pembentukan fasa feritik FeCr. Setelah 22 menit *sintering* struktur mikro sampel terlihat homogen dengan kandungan porositas kecil. Kekerasan sampel paduan menunjukkan peningkatan secara signifikan dari 116,3 HV setelah 16 menit menjadi 142,833 HV setelah 22 menit.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada para pimpinan PSTBM atas bantuannya dalam penelitian ini dan Direktorat Penguatan Riset dan Pengembangan Kemenristekdikti yang telah memberikan dukungan dana penelitian ini melalui program INSINAS 2017.

## DAFTAR PUSTAKA,

### Daftar Pustaka

1. B Bandriyana, Dimiyati A. Aplikasi Peralatan Arc Plasma Sintering Dalam Sintesis Paduan Berbasis Fe-Cr Untuk Material Struktur Reaktor. Seminar Nasional Sains dan Teknologi Nuklir 2017 Bandung 14 Nov 2017. **ISSN 1858-3601**
2. Rohmad Salam dan Arbi Dimiyati, Desain dan Perakitan Arc Plasma Sintering Type APS.2, Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir 2017 yogyakarta 28 Nov 2017 **ISSN 0216-3128**
3. Rohmad Salam, Arbi Dimiyati, Ade Mardiyadi. Rekayasa Permukaan Baja Karbon Menggunakan Arc Plasma Sintering, Seminar Nasional Sains dan Teknologi Nuklir 2017. Bandung 14 Nov 2017 **ISSN 1858-3601**
4. A. Sujatno, R. Salam, B. Bandriyana, A. Dimiyati, Studi Scanning Electron Microscopy (SEM) untuk Karakterisasi Proses Oksidasi Paduan Zirkonium, Seminar Nasional X, SDM Teknologi Nuklir (2014), Yogyakarta 10 sept 2014 **346-354**.
5. B bandriyana , Arbi Dimiyati, B sugeng, Rohmad salam, Sumaryo, Agus Sudjatno Microstructur and phase analysis of Zirconia-ODS (Oxide Dispersion Strengthen) alloy sintered by APS with milling time variation IOP, publishing Material Science and 243 (2018) 012035..
6. Rohmad Salam, sumaryo, A Sudjatno, Imam wahyono, Arbi Dimiyati. Studi Struktur Mikro baja Fe<sub>12</sub>Cr-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Hasil Proses Arc Plasma Sintering, Prosiding Seminar Nasional XIX Kimia dalam Pembangunan 2016. Yogyakarta 26 Mei 2016 **ISSN: 0854-4778**
7. D. Sebayang, D. S. Khaerudini, H. Saryanto, M.A. Othman, M. H. Saleh, D. Fredrick, P. Untoro, "Microstructure and Mechanical Properties of Nanocrystalline FeCr Alloy Prepared by Spark Plasma Sintering", Applied Mechanics and Materials, Vols. 52-54, pp. 2197-2202, 2011
8. H. Wang, W. M. Wang, Z. Y. Fu, "Microstructure and Properties of Mulite-FeCr Multifunctional Composite", Advanced Materials Research, Vol. 66, pp. 81-84, 2009
9. A. Agüero, M. Gutiérrez, R. Muelas, "Steam Oxidation Testing of Coatings for Next Generation Steam Power Plant Components", Materials Science Forum, Vols. 522-523, pp. 205-212, 2006
10. H. Wang, W. M. Wang, Z. Y. Fu, "Microstructure and Properties of Mulite-FeCr Multifunctional Composite", Advanced Materials Research, Vol. 66, pp. 81-84, 2009

## **EKSTRAKSI TORIUM DARI MONASIT BANGKA DENGAN METODE SOLVENT IMPREGNATED RESIN (SIR)**

**Riesna Prassanti<sup>1</sup>, Rudi Pudjianto<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Pusat Teknologi Bahan Galian Nuklir – Badan Tenaga Nuklir Nasional  
Jalan Lebak Bulus Raya No. 9 Jakarta Selatan 12440

email: [riesna@batan.go.id](mailto:riesna@batan.go.id)

### **ABSTRAK**

**EKSTRAKSI TORIUM DARI MONASIT BANGKA DENGAN METODE SOLVENT IMPREGNATED RESIN (SIR).** Tahapan pengolahan monasit Bangka secara basa menghasilkan produk berupa natrium fosfat, RE (*Rare Earth*) Hidroksida, Uranium, serta Torium. Natrium fosfat telah terambil 99% dengan kemurnian 99%. Sedangkan RE Hidroksida telah terpisah dari zat radioaktif uranium (U) dan torium (Th) dengan *recovery* 85%. Adapun U dan Th yang dihasilkan belum terpisah sempurna. Pada penelitian sebelumnya telah dilakukan pemisahan U dan Th dengan metode ekstraksi pelarut dan metode pengendapan, akan tetapi hasil yang diperoleh masih belum optimal. Metodologi pada penelitian ini adalah ekstraksi Th dengan metode *Solvent Impregnated Resin (SIR)* dengan tujuan memperoleh kondisi optimum ekstraksi Th. Resin penyokong yang digunakan adalah amberlite XAD-16 dengan ekstrak yang diimpregnasikan *Tributyl Phosphate (TBP)*. Parameter yang diteliti adalah pengaruh pH dan waktu ekstraksi terhadap *recovery* Th. Hasil penelitian menunjukkan kondisi optimum ekstraksi Th dari monasit dengan metode *Solvent Impregnated Resin* pada pH 1 dan waktu 30 menit, *recovery* Th 81,13%, U 25,15%, dan RE 0,09%.

Kata kunci: monasit, SIR, torium, TBP, amberlite XAD-16

### **ABSTRACT**

**THORIUM EXTRACTION IN BANGKA MONAZITE USING SOLVENT IMPREGNATED RESIN (SIR) METHOD.** The stages of Bangka monazite processing with alkaline method produce sodium phosphate, RE (*Rare Earth*) Hydroxide, Uranium, and Thorium. Sodium phosphate has been taken 99% with 99% purity. While RE Hydroxide has been separated from radioactive element uranium (U) and torium (Th) with 85% recovery. While the U and Th produced were not completely separated yet. In previous studies, separation of U and Th has been carried out with solvent extraction methods and precipitation methods, but the results obtained were still not optimal. In this research, Th extraction was carried out using the *Solvent Impregnated Resin (SIR)* method with the aim for obtaining the optimum conditions of Th extraction. The supporting resin used was amberlite XAD-16 with impregnated *Tributyl phosphate (TBP)* extractant. The parameters studied were the effect of pH and extraction time on *recovery* Th. The results showed that the optimum extraction conditions of Th from monazite by *Solvent Impregnated Resin* method at pH 1 and 30 minutes, Th *recovery* was 81,13%, U 25,15%, and RE 0,09%.

Keyword: monazite, SIR, thorium, TBP, amberlite XAD-16

### **PENDAHULUAN**

Monasit merupakan mineral fosfat yang mengandung logam tanah jarang / rare earth (RE), uranium (U) dan torium (Th). Sebagai hasil samping penambangan timah, keberadaan monasit sangat melimpah di Indonesia terutama di Pulau Bangka. Kandungan RE, U, Th, dan fosfat (PO<sub>4</sub>) dalam monasit Bangka berturut-turut 50-67 %, 1500-3000 ppm, 2,5-3,6%, dan 18-30% [1]. Adanya unsur radioaktif U dan Th dalam monasit menjadikan Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) khususnya Pusat Teknologi Bahan Galian Nuklir (PTBGN) sebagai lembaga yang berwenang dalam pengolahan monasit. Monasit merupakan mineral yang berharga karena unsur-unsur yang terkandung di dalamnya mempunyai nilai ekonomis dan strategis antara lain U dan Th digunakan sebagai bahan bakar nuklir, RE digunakan sebagai bahan baku dalam industri nuklir, elektronika dan otomotif sedangkan PO<sub>4</sub> digunakan sebagai bahan baku pembuatan pupuk kimia [1]. PT Timah sebagai produsen timah terbesar di Indonesia memiliki persediaan monasit yang melimpah. Kerjasama antara

PT Timah dengan PTBGN – BATAN dalam pengolahan monasit telah dirintis sejak tahun 1990-an. Sampai dengan tahun 2009 telah diperoleh teknologi pengambilan RE melalui tahapan proses dekomposisi, pelarutan parsial, pengendapan pH 6,3, dan pengendapan pH 9,8 dengan recovery RE 85% [2]. Di samping RE, diperoleh pula U dan Th, akan tetapi keduanya belum terpisah. Metode yang bisa digunakan untuk pemisahan U dan Th antara lain penukar ion, oksidasi-reduksi, pengendapan, ekstraksi fase padat, elektrodeposisi, dan filtrasi [3]. Litbang pemisahan U dari Th pada monasit telah dilakukan dengan metode ekstraksi pelarut [2] dan metode pengendapan [4]. Akan tetapi hasil yang diperoleh masih belum optimal yaitu uranium dan torium belum terpisah sempurna. Oleh karena itu dilakukan penelitian pemisahan Th pada monasit dengan metode Solvent Impregnated Resin (SIR). PLTN dengan bahan bakar berbasis Th saat ini tengah menarik perhatian dunia karena reaktor beroperasi pada tekanan atmosferik, tidak ada gas hidrogen yang dapat meledak, lebih bersih, lebih murah serta limbah nuklir yang dihasilkan lebih sedikit [5]. SIR adalah metode pemisahan yang menggabungkan antara ekstraksi pelarut dan penukar ion. Resin penyokong yang digunakan adalah amberlite XAD-16 sedangkan ekstraktan yang diimpregnasikan adalah *Tributyl Phosphate* (TBP) [6]. Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh kondisi optimum ekstraksi Th dengan metode *Solvent Impregnated Resin* (SIR). Adapun parameter yang diteliti adalah pengaruh pH dan waktu ekstraksi terhadap *recovery* Th.

## TEORI

### **Solvent Impregnated Resin (SIR)**

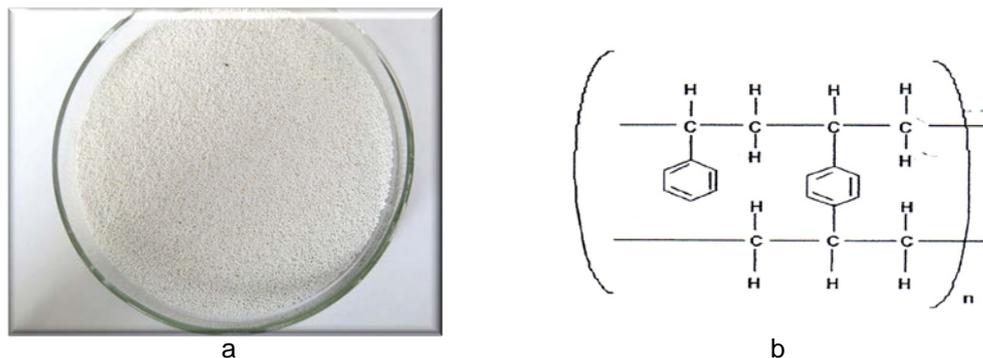
SIR adalah metode pemisahan yang menggabungkan antara ekstraksi pelarut dan penukar ion. Pada proses pemisahan unsur dengan ekstraksi pelarut, kapasitas olah dan selektivitas tinggi, serta laju transfer massa cepat. Akan tetapi perolehan kembali setelah terekstrak membutuhkan banyak tahap dan pemisahan kurang optimal [7]. Sedangkan pada proses pemisahan unsur dengan penukar ion, tahapan proses lebih sederhana, tidak ada pelarut yang hilang dan mudah untuk pemisahan fase cair/padat. Akan tetapi, selektivitas rendah [6]. SIR memberikan prospek cukup baik karena menggabungkan metode pemisahan ekstraksi pelarut dan penukar ion. Metode ini berdasarkan modifikasi *solid support* untuk memisahkan ion logam dari matrik kompleks [8]. Dengan proses SIR diharapkan akan diperoleh pemisahan unsur dengan selektivitas tinggi, kapasitas besar, tahapan proses sederhana dan tidak ada pelarut yang hilang. SIR dibuat dengan mengamobilkan suatu zat pengeksktrak ke dalam suatu polimer berpori besar yang tidak bergugus fungsi. Polimer penyokong secara ideal merupakan polimer organik *microporous* dengan luas permukaan tinggi dan kestabilan mekanik yang baik, karakteristik aliran dan mempunyai pengembangan (*swelling*) pelarut yang rendah selama proses impregnasi [9].

### **Amberlite XAD-16**

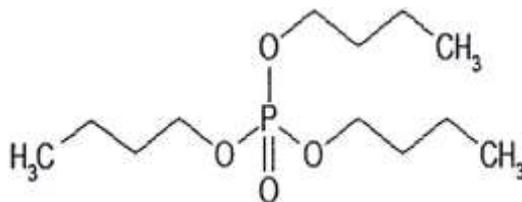
Salah satu resin polimer berpori besar komersial yang banyak digunakan sebagai penyokong pada SIR adalah polistiren divinilbenzen (PSDVB). Salah satu merek dagang PSDVB adalah XAD yang merupakan polimer non ionik yang mempunyai ikatan silang. XAD berbentuk butiran putih yang tidak larut dalam air [9]. Resin ini mempunyai struktur makroretikular yaitu terdiri dari sebuah fasa rantai polimer dan fasa rantai berpori dengan luas permukaan yang tinggi sehingga dapat berperan sebagai materi pengabsorpsi. XAD-16 merupakan XAD dengan gugus ikatan silang aromatik [9]. Polimer XAD-16 adalah polimer non ionik, non polar, hidrofob dengan permukaan yang luas, ketahanan yang kuat dan mempunyai gugus aromatik pada permukaannya. Resin ini mempunyai porositas, volume pori dan luas permukaan melebihi jenis amberlite yang lainnya sehingga kapasitas untuk menampung ekstraktan menjadi lebih besar [10].

### **Tributyl Phosphate (TBP)**

TBP adalah senyawa organik yang mempunyai rumus  $C_{12}H_{27}PO_4$ , merupakan solven pengeksktraksi torium yang mempunyai koefisien distribusi dan selektivitas yang tinggi, tahan radiasi, dan tahan asam [11].



Gambar 1. a. Resin Amberlite XAD-16, b. Rumus Struktur Resin Amberlite XAD-16 [6]



Gambar 2. Rumus Struktur TBP [6]

## METODOLOGI

**Bahan:** Monasit, asam klorida (HCl), asam sulfat (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), amonium hidroksida (NH<sub>4</sub>OH), Resin Amberlite XAD-16, asam nitrat (HNO<sub>3</sub>), soda kaustik (NaOH), aquabidest, aseton, TBP.

**Alat:** Gelas beker, gelas ukur, gelas arloji, motor pengaduk, kertas saring, timbangan, oven.

### Metode:

Pembuatan umpan larutan torium sulfat dilakukan melalui tahapan proses dekomposisi monasit dengan NaOH dan pelarutan parsial dengan HCl. Residu pelarutan parsial dilarutkan dengan HCl kemudian filtratnya diendapkan dengan NH<sub>4</sub>OH, selanjutnya endapan dilarutkan dengan H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> sehingga diperoleh larutan torium sulfat.

Pengkondisian (preparasi) resin amberlite XAD-16 dilakukan dengan tahapan pencucian resin dengan HNO<sub>3</sub> 2 M, NaOH 2 M, aquabidest dan aseton kemudian dikeringkan dengan oven suhu 50 °C.

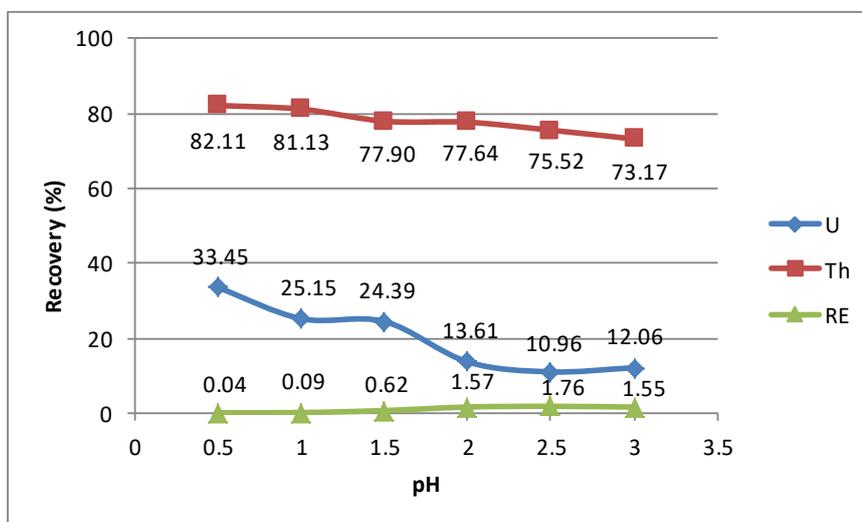
Impregnasi TBP ke resin amberlite XAD-16 dilakukan dengan mencampur resin terkoneksi dengan TBP dan aseton kemudian diaduk dengan kecepatan 250 rpm selama 2 jam selanjutnya dibiarkan selama 24 jam. Setelah itu disaring dan dikeringkan dengan oven suhu 50 °C.

Ekstraksi Th parameter pH: 10 ml Larutan torium sulfat dengan variasi pH 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3 dicampur dengan 100 mg SIR-TBP diaduk dengan kecepatan 300 rpm selama 30 menit pada suhu kamar. Setelah pengadukan, kedua fase dibiarkan terpisah selama 2 menit. Banyaknya torium yang terekstraksi ditentukan dengan cara menentukan konsentrasi torium yang tersisa dalam larutan secara spektrofotometri.

Ekstraksi Th parameter waktu: 10 ml Larutan torium sulfat pada pH optimum dicampur dengan 100 mg SIR-TBP diaduk dengan kecepatan 300 rpm selama variasi waktu 15, 30, 60, 90, 120 menit pada suhu kamar. Setelah pengadukan, kedua fase dibiarkan terpisah selama 2 menit. Banyaknya torium yang terekstraksi ditentukan dengan cara menentukan konsentrasi torium yang tersisa dalam larutan secara spektrofotometri.

### HASIL DAN PEMBAHASAN

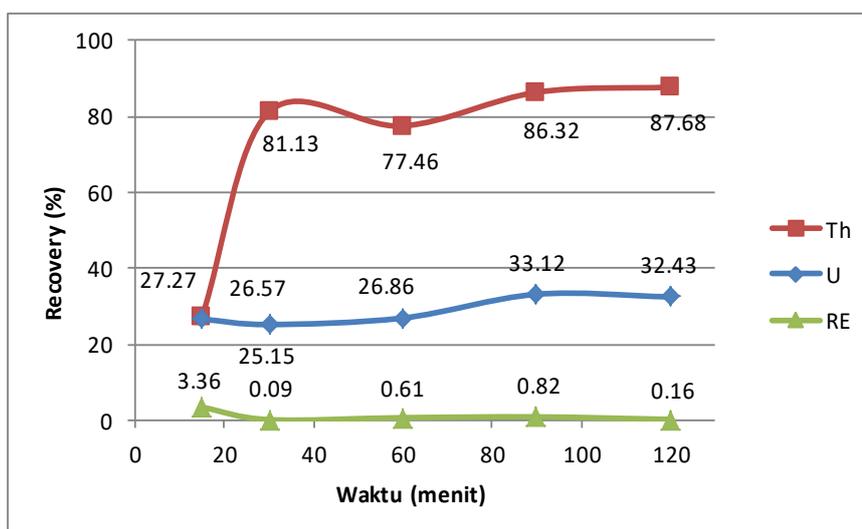
Grafik hasil ekstraksi Th dari monasit dengan metode SIR parameter pH disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Grafik hasil ekstraksi Th dari monasit dengan metode SIR parameter pH

Dari Gambar 3 dapat dilihat bahwa semakin tinggi pH, Th yang terekstrak semakin kecil. Hal ini disebabkan pada pH yang semakin tinggi Th akan mulai mengendap. Fenomena ini sesuai dengan hasil penelitian pengendapan Th dari bijih thorit yang optimal mengendap pada pH 4,5 [12]. Adanya Th yang mulai mengendap pada pH yang semakin tinggi menyebabkan keberadaan torium yang terlarut berkurang sehingga Th yang terekstrak semakin kecil. Selain itu dapat dilihat pula bahwa U dan RE masih ikut terekstrak walaupun dengan konsentrasi kecil. Dari data di atas dipilih pH optimum ekstraksi Th pada pH 1.

Grafik hasil ekstraksi Th dari monasit dengan metode SIR parameter waktu disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Grafik hasil ekstraksi Th dari monasit dengan metode SIR parameter waktu

Dari Gambar 4 dapat dilihat bahwa sampai dengan waktu ekstraksi 30 menit, recovery Th yang terekstrak meningkat secara signifikan sampai 81,13 %. Hal ini karena semakin lama waktu ekstraksi, maka kontak antara larutan umpan yang kaya Th dengan ekstrak TBP yang terimregnasi pada resin amberlite XAD-16 akan semakin lama pula sehingga Th yang

terdistribusi dari fase larutan ke fase SIR semakin banyak [13]. Akan tetapi setelah waktu 30 menit Th yang terekstrak cenderung konstan, hal ini karena pada waktu 30 menit proses ekstraksi sudah mencapai kesetimbangan sehingga meskipun waktu ditambah tidak meningkatkan jumlah Th yang terekstrak. Pada percobaan variasi waktu ini, U juga masih ikut terekstrak kurang lebih 30 % dan RE kurang dari 1 %.

Berdasarkan data pada Gambar 3 dan Gambar 4, dipilih kondisi optimum ekstraksi Th pada monasit dengan metode SIR pada pH 1 dan waktu ekstraksi 30 menit.

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, diperoleh kondisi optimum ekstraksi Th pada monasit dengan metode SIR pada pH 1 dan waktu ekstraksi 30 menit dengan recovery Th 81,13%, dan U serta RE terikut masing-masing 25,15% dan 0,09%.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada semua teman-teman di Bidang Teknologi Penambangan dan Pengolahan serta PTBGN-BATAN pada umumnya yang telah membantu kelancaran pelaksanaan penelitian sampai terwujudnya makalah ini.

## DAFTAR PUSTAKA, ARIAL 10 BOLD

1. RIESNA P., Digesti Monasit Bangka Dengan Asam Sulfat, Eksplorium, Buletin Pusat Pengembangan Geologi Nuklir, Vol. 33, No. 1, pp 41 – 54, Jakarta (2012).
2. KURNIA T., RIESNA P., SUMARNI, RUDI P., Pemisahan Uranium dari Torium pada Monasit dengan Metode Ekstraksi Pelarut Alamin, Eksplorium, Vol. 33, No. 155, pp 47 – 52, Jakarta (2011).
3. ISMAIL Y., ELIF V.O., IBRAHIM D., SADIN O., RECEP Z., A New Method for Praconcentration of Th(IV) and Ce(III) by Thermophilic Anoxybacillus Flavithermus Immobilized on Amberlite XAD-16 Resin as A Novel Biosorbent, Ecological Engineering, 103, pp 43-49 (2017).
4. KURNIA T., SUMIARTI, Pemisahan Torium dari Uranium pada Monasit dengan Metode Pengendapan, Eksplorium, Vol. 33, No. 1, pp 55-62, Jakarta (2013)
5. ERLAN D., Analisis Potensi Torium sebagai Bahan Bakar Nuklir Alternatif PLTN, Jurnal Pengembangan Energi Nuklir, Vol. 14, No. 1, pp 45-56, Jakarta (2012)
6. RIESNA P., BUDI Y.A., SUMIARTI, Efektifitas impregnasi TBP, D2EHPA dan campuran TBP-D2EHPA pada resin amberlite XAD-16 sebagai *Solvent Impregnated Resin* (SIR) Uranium dari Monasit, Seminar Nasional Iptek Nuklir Dasar dan Terapan Tahun 2018, Yogyakarta (2018)
7. NIA R., BUCHARI, Pemisahan Unsur-unsur Logam Tanah Jarang La<sup>3+</sup>, Ce<sup>3+</sup>, Nd<sup>3+</sup> dari Mineral Monasit dengan Metode Solvent Impregnated Resin (SIR), Jurnal Matematika dan Sains, Vol. 14 No. 1, Bandung (2009).
8. AHMED M.D., ASEM A.A., EWAIS M.M.M., ANAS M.E., MAHMOUD O.A., Removal of Uranium (VI) from Aqueous Solution Using Glycidyl Methacrylate Chelating Resins, Hydrometallurgy, 95, pp 183-189 (2008).
9. ROHM and HAAS, Product Data Sheet Amberlite XAD-16, (2003).
10. HELALY O.S., GHANY M.S., Extraction of Cerium(IV) Using Tributyl Phosphate Impregnated Resin from Nitric Acid Medium, Journal Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 22, pp 2016-214 (2012)
11. QIU S., LI S., DONG Y., SU X., WANG Y., SHEN Y. SUN X., A High-Performance Impregnated Resin For Recovering Torium From Radioactive Rare Earth Waste Residue, Journal of Molecular Liquids, 237, 380-386 (2017).
12. MOCH IQBAL N.S., MUTIA A., MOHAMMAD Z.M., KURNIA S.W., Studi Ekstraksi Bijih Thorit dengan Metode Digesti Asam dan Pemisahan Thorium dari Logam Tanah Jarang dengan Metode Oksidasi-Presipitasi Selektif, Eksplorium, Vol. 38, No. 2, pp 109–120, Jakarta (2017)

13. HABASHI F., Principles of Extractive Metallurgy , Volume 2 Hydrometallurgy, Gordon & Breach, Science Publishers, Inc., New York (1980)

## **PENENTUAN *HVL* BATA HEBEL DAN TIMAH HITAM PENAHAN RADIASI BETATRON 7 MeV**

**Djoli Soembogo**

*Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi-BATAN, Jalan Lebak Bulus Raya No. 49, Jakarta 12440.*  
[djoli@batan.go.id](mailto:djoli@batan.go.id)

### **ABSTRAK**

**PENENTUAN *HVL* BATA HEBEL DAN TIMAH HITAM SEBAGAI PENAHAN RADIASI BETATRON 7 MeV.** Telah dilakukan uji penentuan nilai tebal paro (*HVL*) bata hebel dan timah hitam penahan radiasi betatron 7 MeV. Material penahan radiasi berupa bata hebel, dan timah Hitam (Pb). Kajian ini dilakukan karena betatron memiliki radiasi tinggi. Radiasi 7 MeV yang ditimbulkan betatron sangat beresiko bahaya terhadap keselamatan dan kesehatan manusia dan lingkungan. Adapun tujuan dari kajian ini adalah penggunaan penahan radiasi betatron yang aman dan efektif dengan mengetahui nilai tebal paroh material bata hebel dan timah hitam sebagai penahan radiasi betatron. Betatron dioperasikan dengan energi 7 MeV, jarak antara betatron dan material penahan radiasi 3 meter, dan waktu paparan radiasi 5 menit. Hasil kajian nilai tebal paro (*HVL*) material penahan radiasi pada energi 7 MeV didapatkan *HVL* batako hebel 346,574 cm, dan timah hitam (Pb) 1,925 cm, yang mendekati nilai yang diacu. Dinding bangunan bata hebel perlu dikompositkan dengan timah hitam blok sebagai penahan radiasi betatron sebesar 7 MeV agar efektif dan layak dari segi proteksi radiasi dan keselamatan lingkungan.

Kata kunci : Bata hebel, Timah hitam, Betatron

### **ABSTRACT**

**HVL DETERMINATION OF BRICK HEBEL AND LEAD AS SHIELDING OF RADIATION BETATRON 7 MeV.** . There has been examination on half value layer (*HVL*) of break hebel and lead for shielding radiation of 7 MeV betatron. The radiation shielding material was taken in the form of brick hebel and lead (Pb). This study was conducted considering the highly radiation of betatron. The radiation produced by betatron 7 MeV is at greatest risk on safety and human health and environmental. The purpose of this study is to use safe and effective radiation shielding by knowing the half value layer of shielding material for betatron radiation. Betatron was operated in 7 MeV energy, the distance between betatron and radiation shielding material of 3 meters, and radiation exposure time of 5 minutes. The study result of half value layer (*HVL*) shielding material of radiation at 7 MeV energy obtained as for *HVL* of brick hebel was 346,574 cm, and lead (Pb) was 1,925 cm, which were close to the referred value. Hebel brick of building wall needs to be composited with lead block for 7 MeV betatron radiation shielding to be effective and feasible in terms of radiation protection and environmental safety.

Keyword : Brick hebel, Lead, Betatron

### **PENDAHULUAN**

Saat ini mesin betatron 7 MeV sudah mulai digunakan untuk uji radiografi untuk material metal dengan ketebalan sampai dengan 300 mm. Betatron ini bersifat mobilisasi yang dapat bergerak dari satu lokasi ke lokasi lainnya. Betatron ini termasuk jenis *cyclic accelerator* elektron, yang pemercepatan elektronnya secara siklik. Betatron dengan energi 7 MeV merupakan energi radiasi yang tinggi, maka diperlukan adanya pengujian mengenai penahan radiasi betatron yang handal. Penahan radiasi betatron 7 MeV yang handal dapat diketahui dengan melihat nilai tebal paro atau *half value layer (HVL)*. Material penahan radiasi betatron diambil bata hebel dan timah hitam (Pb)[1][2], hal ini biasa digunakan pada konstruksi bangunan. Maksud kajian ini adalah mengetahui nilai *half value layer (HVL)*[3] untuk bata hebel dan timah hitam (Pb). Tujuan kajian ini adalah proteksi radiasi betatron dengan dicapainya tingkat keselamatan dan kesehatan yang tinggi terhadap manusia dan lingkungan.

### METODE DAN BAHAN

Prinsip dasar penahan radiasi betatron adalah mereduksi berkas intensitas radiasi betatron dibalik dinding penahan radiasi. Reduksi berkas intensitas radiasi betatron ini terjadi akibat interaksi radiasi yang ditimbulkan mesin betatron dengan penahan radaisi. Dinding kontruksi bangunan dipakai bata hebel dan dinding penahan radiasi menggunakan bahan dengan densitas tinggi atau nomor atom tinggi seperti timah hitam (Pb), karena dapat menyerap energi radiasi [3], [4], [5], [6].

$$D_t = D_o \cdot \text{Exp}(-\ln 2 \times t/\text{HVL})$$

D<sub>t</sub> = Dosis setelah melewati penahan

D<sub>o</sub> = Dosis sebelum melewati panahan

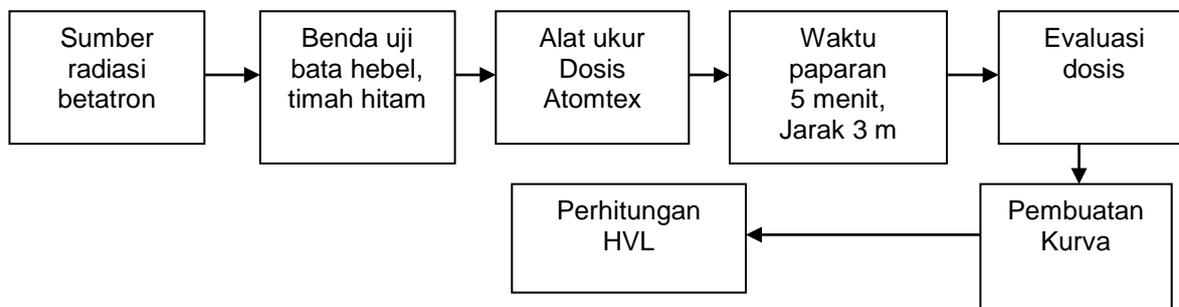
t = tebal penahan

HVL = nilai tebal paro

Bahan dan peralatan pengkajian penentuan nilai tebal paro penahan radiasi betatron adalah sebagai berikut :

- |                                |        |
|--------------------------------|--------|
| 1. Bata habel                  | 6 blok |
| 2. Pb pelat/blok               | 3/2    |
| 3. Mesin Betatron              | 1 unit |
| 4. Power supply                | 1 unit |
| 5. UPS                         | 1 unit |
| 6. Control sistem              | 1 unit |
| 7. Alat pengukur dosis Atomtex | 1 set  |
| 8. Kamera digital              | 1 unit |
| 9. Roll meter                  | 1 set  |

Pengkajian ini menggunakan pengukuran perekaman dosis selama 5 menit pada jarak paparan radiasi 3 meter. Pengukuran perekaman dosis radiasi [5] diambil pada energi maksimal betatron yaitu 7 MeV. Hal ini dengan mempertimbangkan bahwa energi dibawah 7 MeV akan aman dan selamat jika menggunakan energi maksimal 7 MeV, aman dan selamat bagi mesin betatron dan operatornya.



Gambar 1. Langkah-langkah kerja.



Gambar 2. Alat Betatron 7 MeV dan alat pengukur dosis Atomtex.



Gambar 3. Bata hebel dan alat Atomtex.



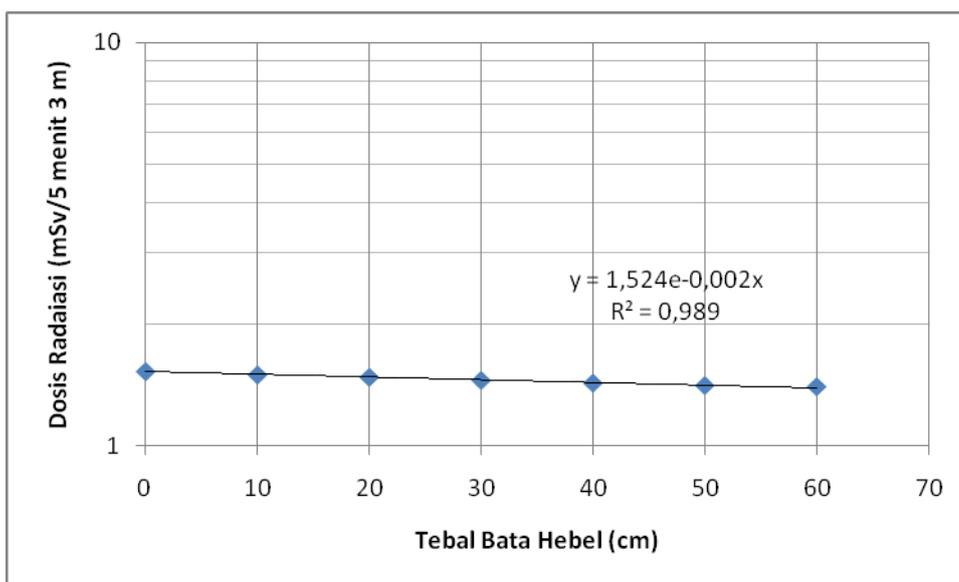
Gambar 4. Pelat Timah hitam dan alat Atomtex.

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengkajian penentuan nilai tebal paro penahan radiasi betatron yaitu sebagai berikut :

Tabel 1. Hubungan dosis radiasi betatron 7 MeV pada jarak 3 meter dengan ketebalan bata hebel

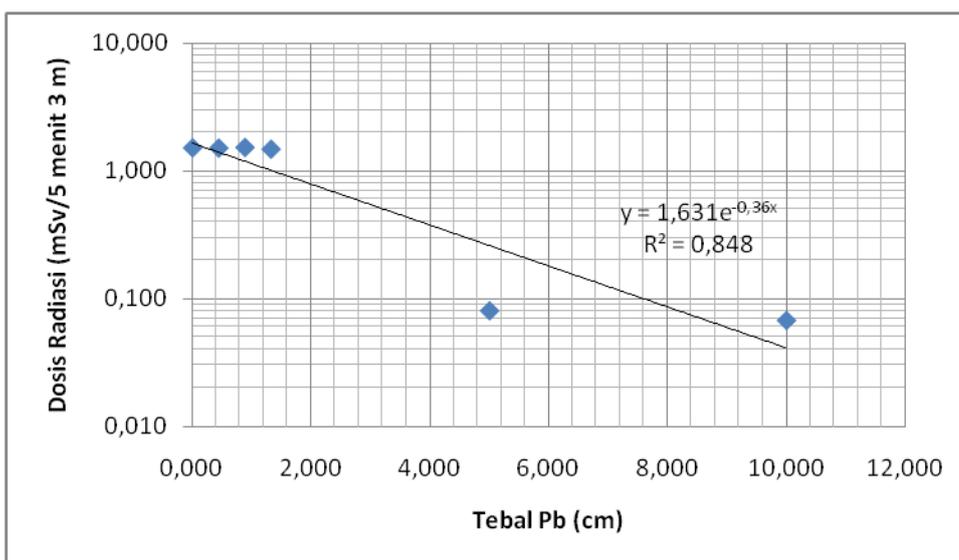
Tebal (cm)	Dosis 1 (mSv)	Dosis 2 (mSv)	Dosis 3 (mSv)	Dosis rerata (mSv)
0,000	1,530	1,530	1,530	1,530
10,000	1,500	1,500	1,500	1,500
20,000	1,480	1,480	1,480	1,480
30,000	1,460	1,450	1,450	1,453
40,000	1,430	1,430	1,430	1,430
50,000	1,410	1,410	1,410	1,410
60,000	1,400	1,400	1,400	1,400



Gambar 5. Kurva hubungan Tebal Bata Hebel dan Dosis Radiasi.

Tabel 2. Hubungan dosis radiasi betatron 7 MeV pada jarak 3 meter dengan ketebalan timah hitam

Tebal (cm)	Dosis 1 (mSv)	Dosis 2 (mSv)	Dosis 3 (mSv)	Dosis rerata (mSv)
0,000	1,520	1,510	1,520	1,517
0,440	1,510	1,510	1,510	1,510
0,880	1,580	1,500	1,500	1,527
1,320	1,480	1,480	1,480	1,480
5,000	0,081	0,081	0,081	0,081
10,000	0,068	0,068	0,068	0,068



Gambar 6. Kurva hubungan Tebal Pb dan Dosis Radias

Berdasarkan kurva-kurva tersebut diatas, dapat dihitung besarnya HVL (*Half Value Layer*) dan diperlihatkan pada tabel 3.

Tabel 3. HVL pada energy 7 MeV untuk bata hebel dan Pb.

Energi (MeV)	HVL bata hebel (cm)	HVL Pb (cm)
7	346,574	1,925

Berdasarkan pengamatan hasil pada tabel 3 didapat nilai hasil yang mendekati nilai pada tabel 4 (acuan)[7]. Perbedaan ini dapat disebabkan sebagai berikut [6] :

1. Faktor hamburan paparan radiasi
2. Faktor bentuk geometrik dan komposisi benda penahan radiasi
3. Faktor alat ukur paparan radiasi yang digunakan
4. Faktor sumber paparan radiasi yang dipergunakan
5. Faktor pemfokusan paparan radiasi

Dari data-data diatas bahwa untuk membangun suatu bangunan konstruksi penahan radiasi betatron perlu dilakukan kajian lapangan, bukan berdasarkan acuan. Pelaksanaan suatu konstruksi penahan radiasi betatron digunakan komposisi material yang komposit atau campuran agar saling menyatu untuk mendapatkan proteksi radiasi yang optimal. Betatron ini bersifat mobilisasi, maka pelaksanaan suatu konstruksi penahan radiasi betatron perlu disesuaikan dengan kondisi dilapangan, lokasi lingkungan padat orang atau lingkungan yang tidak berpenghuni. Bangunan konstruksi menggunakan dinding bata hebel yang tidak efektif dan tidak layak sebagai penahan radiasi betatron sebesar 7 MeV, perlu dikompositkan dengan timah hitam blok sebagai penahan radiasi Betatron sebesar 7 MeV agar efektif dan layak dari segi proteksi radiasi dan keselamatan lingkungan

#### KESIMPULAN

Hasil pengukuran dosis radiasi paparan betatron 7 MeV didapatkan HVL bata hebel 346,574 cm, dan timah hitam (Pb) 1,925 cm, yang mendekati nilai yang diacu. Dengan diketahuinya HVL suatu material penahan radiasi maka dapat dihitung tebal penahan radiasi yang aman bagi pekerja radiasi atau lingkungan. Pelaksanaan suatu konstruksi penahan radiasi betatron perlu disesuaikan dengan kondisi dilapangan, lokasi lingkungan padat orang atau lingkungan yang tidak berpenghuni. Dinding bangunan bata hebel perlu dikompositkan dengan timah hitam blok sebagai penahan radiasi betatron sebesar 7 MeV agar efektif dan layak dari segi proteksi radiasi dan keselamatan lingkungan

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada :  
Rekan-rekan Kelompok Investigasi Tak Merusak dan Diagnosis di Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi yang telah membantu terbentuknya makalah ini.

#### DAFTAR PUSTAKA

1. ITSNA NUZULA RAHMA, Kajian dan Analisis Pelat Timbal (Pb) bekas tutup instalasi listrik pada atap rumah sebagai bahan proteksi radiasi sinar-X, skripsi jurusan Fisika, Universitas Negeri Semarang, (2016).
2. TRI SUSANTI, Komposit Poliester Timbal sebagai material proteksi radiasi untuk pengganti kaca timbal, skripsi jurusan Fisika, Universitas Negeri Semarang (2015).
3. PUSDIKLAT BATAN, Radiografi Level II Standar dan Petunjuk Praktikum, Jakarta (2013).
4. TSOUFANIDIS, NICHOLAS, Measurement and detection of radiation , copyright 1983.
5. ASME, ASME section V, article 2 Radiographic Examination, New York, (2017).
6. DJOLI SOEMBOGO, Penentuan Nilai Tebal Paro Penahan Radiasi Betatron, Semnas SNINDT 2018, PSTA-BATAN, Yogyakarta, (2018).
7. RANY SAPTA AJI, ELISABETH SUPRIYAT-NI, SUTADI, Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Teknologi Akselerator dan Aplikasinya, Vol. 5, No. J. Oktober 2003.. 158 -165.
8. TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY, Small-Size Electron Accelerator SEA-7 Technical Specification and Operating Manual, (2015).

**LAMPIRAN 1.**

Tabel 4. HVL acuan [7]

Peak Voltage (kV)	Attenuation material					
	Lead (mm)		Concrete (cm)		Iron (cm)	
	HVL	TVL	HVL	TVL	HVL	TVL
70	0.17	0.52	0,84	2.8		
100	0.27	0.88	1.6	5.3		
125	0.28	0.93	2.0	6.6		
150	0.30	0.99	2.24	7.4		
200	0.52	1.7	2.5	6.4		
250	0.88	2.9	2.8	9.4		
300	1.47	4.8	3.1	10.4		
400	2.5	8.3	3.3	10.9		
500	3.6	11.9	3.6	11.7		
1000	7.9	26	4.4	14.7		
2000	12.5	42	6.4	21		
3000	14.5	48.5	7.4	24.5		
4000	16	53	8.8	29.2	2.7	9.1
6000	16.9	56	10.4	34.5	3.0	9.9
8000	16.9	56	11.4	37.8	3.1	10.3
10000	16.6	55	11.9	39.6	3.2	10.5
Cs-137	6.5	21.6	4.8	15.7	1.6	5.3
Co-60	12	40	6.2	20.6	2.1	6.9

**LAMPIRAN 2.** Relatif distribusi dosis rerata pada posisi datar horizontal dengan 7,0 MeV [8]

Angle, Deg	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
Value, %	100	57	11	6,4	9,0	6,6	3,2	3,2	3,2	3,5	4,0	3,2	3,0	2,1	3,6	3,2
Angle, Deg	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310
Value, %	2,1	2,3	3,8	4,1	4,8	4,3	2,1	2,8	2,6	1,3	1,1	2,2	3,7	4,8	5,5	5,0
Angle, Deg	320	330	340	350												
Value, %	7,4	1,1	3,1	5,8												

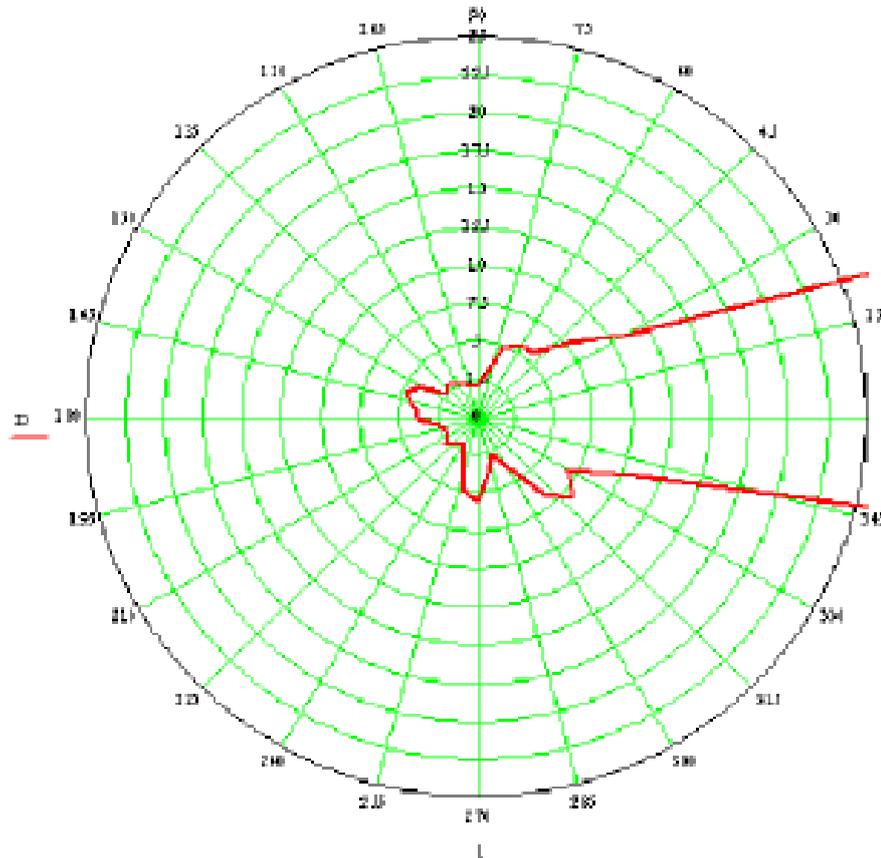


Fig.15. Relative distribution of the dose rate in horizontal plane, 7.0 MeV

Halaman ini sengaja di kosongkan

## KETAHANAN EROSI KAVITASI PADUAN BERBASIS NIKEL UNTUK APLIKASI GENERATOR UAP REAKTOR DAYA EKSPERIMENTAL

Muhammad Awwaluddin<sup>1</sup>, Sri Hastuty<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Pusat Rekayasa Fasilitas Nuklir BATAN, Kawasan PUSPIPTK, Serpong, 15310, Indonesia

<sup>2</sup> Program Studi Teknik Mesin, Universitas Pertamina, Jakarta, 12220, Indonesia

email: muhammad.awwaluddin@batan.go.id

### ABSTRAK

**KETAHANAN EROSI KAVITASI PADUAN BERBASIS NIKEL UNTUK APLIKASI GENERATOR UAP REAKTOR DAYA EKSPERIMENTAL.** Generator uap bertenaga 10 MW termal adalah bagian penting dalam rancangan besar Reaktor Daya Eksperimental, BATAN. Erosi kavitasi pada material pipa generator uap menjadi isu yang krusial untuk dipelajari karena fluida bergerak dengan kecepatan tinggi. Makalah ini mengulas ketahanan erosi kavitasi pada paduan berbasis Nikel, Inconel 600 dan Inconel 625. Percobaan dilakukan menggunakan prinsip ultrasonic 20 kHz dalam media air. Hasil pengukuran kehilangan massa kumulatif Inconel 600 sebesar 71.2 mg, sedangkan Inconel 625 sebesar 11 mg setelah 12 jam pengujian erosi kavitasi. Dari pengamatan struktur mikro permukaan Inconel 600 ditemukan terdapat banyak cekungan dan retakan yang dalam, namun berbanding terbalik dengan Inconel 625 yang hanya cekungan yang relatif seragam dan sumuran yang dangkal. Pengukuran kekasaran rata-rata permukaan spesimen Inconel 600 menghasilkan 3.1  $\mu\text{m}$  dan Inconel 625 menghasilkan 1.4  $\mu\text{m}$ . Nilai kekerasan dan densitas *twin boundaries* Inconel 625 menjadi sebab naiknya ketahanan erosi kavitasi. Dari data tersebut, Inconel 625 menunjukkan ketahanan erosi kavitasi yang lebih tinggi dibandingkan Inconel 600, sehingga Inconel 625 direkomendasikan menjadi material pipa Generator Uap Reaktor Daya Eksperimental.

Kata kunci: erosi kavitasi, paduan berbasis nikel, Generator Uap, Reaktor Daya Eksperimental.

### ABSTRACT

**CAVITATION EROSION RESISTANCE OF NICKEL BASED ALLOYS FOR STEAM GENERATOR OF EXPERIMENTAL POWER REACTOR.** The 10-MW thermal steam generator is an important part in the Experimental Power Reactor design. Accordingly, cavitation erosion is a crucial issue to be studied since the fluids in steam generator are circulated at a very high velocity. This paper reviews the cavitation erosion resistance of Inconel 600 and Inconel 625 nickel-based alloys. The experiment was carried out by magnetostrictive-induced cavitation at a frequency of 20 kHz in water. From the cumulative mass loss test, it was found that Inconel 600 and Inconel 625 lost 71.2 and 11 mg, respectively. Micro structure analysis showed that Inconel 600 suffered a catastrophic damage, as evidenced by craters and cracks, while Inconel 625 suffered much less. The mean value of surface roughness of Inconel 600 and 625 after the experiment were 3.1  $\mu\text{m}$  and 1.4  $\mu\text{m}$  respectively. The hardness and density of twin boundaries played an important role in the cavitation erosion resistance of Inconel 625. Therefore, Inconel 625 is recommended to be applied as the pipe material of steam generator of experimental power reactor.

Keyword: cavitation erosion, nickel based alloys, steam generator, experimental power reactor.

### PENDAHULUAN

Reaktor Daya Eksperimental (RDE) adalah reaktor daya yang bersifat non komersial dan sedang dikembangkan oleh Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) dengan jenis reaktor tipe *Pebble Bed Reaktor* (PBR). Reaktor ini direncanakan menghasilkan daya termal sebesar 10 MW<sub>th</sub> dengan keluaran daya elektrik sebesar 3 MW<sub>e</sub>. Secara prinsip RDE terdiri dari dua area, yaitu: Area Pembangkit Panas dan Generator Uap serta Area Pembangkit Listrik. Pada area pembangkit panas, panas dibangkitkan melalui reaksi fisi uranium yang

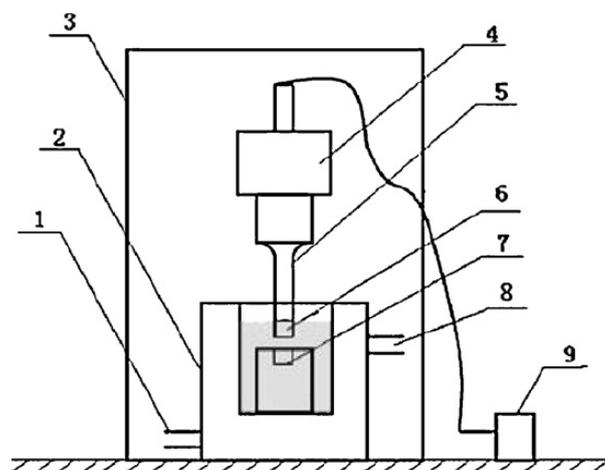
berada pada bola bola (*Pebble bed*) didalam *Reaktor Pressure Vessel* (RPV). Didalam RPV dialirkan helium dengan laju alir rata rata 4.27 kg/s dan tekanan 3 bar sebagai media yang mentransfer panas menuju area Generator Uap dengan suhu mencapai 700°C.

Generator Uap (*Steam Generator*) pada RDE adalah salah satu bagian terpenting dalam pembangkitan listrik melalui perubahan energi *thermal* dan mekanik menjadi energi listrik. Generator uap mengkonversi fasa cair (air) menjadi fasa uap air kering pada laju alir, tekanan dan temperatur yang tinggi. Kondisi perubahan fasa-fasa pada generator uap memiliki energi termal dan mekanik yang besar sehingga pemilihan material harus dilakukan secara hati-hati dan cermat. Beberapa kasus kegagalan mesin penukar panas (*heat exchanger*) yang menggunakan material yang tidak tepat pada kondisi ekstrim, menyebabkan terhentinya proses suatu pabrik, mahalnya biaya perawatan, dan kerugian lainnya baik berupa materiil dan non materiil. Oleh sebab itu, menjadi sangat krusial memilih material yang tepat untuk generator uap RDE. Dua kandidat material yang berkembang pada abad ini adalah Inconel 600 dan Inconel 625, yang merupakan paduan yang berbasis nikel yang berarti paduan tersebut mengandung lebih dari 50% Ni. Paduan ini mempunyai ketahanan pada temperatur tinggi, ketahanan korosi, ketahanan tegangan pada retakan akibat korosi (*stress corrosion cracking*) dan korosi tegangan retak batas butir (*intergranular stress corrosion cracking*). Sifat lain yang tidak kalah pentingnya adalah ketahanan terhadap korosi erosi kavitasi, atau disingkat dengan erosi kavitasi, yang disebabkan oleh lingkungan generator uap yang mengalirkan fluida air dan uap panas dalam kecepatan tinggi.

Makalah ini akan mengulas lebih detail mengenai sifat ketahanan korosi kavitasi erosi Inconel 600 dan Inconel 625 dengan menggunakan media air. Mekanisme kerusakan material akan dijelaskan melalui analisis kehilangan massa, analisis (*Scanning Electron Microscope*) SEM dan uji kekasaran [1]. komposisi kimia dan kekerasan mikro Inconel 600 dan Inconel 625 dapat dilihat pada Tabel 1. Untuk pengujian menggunakan peralatan *magnetostrictive-induced cavitation* seperti terlihat pada Gambar 1.

Tabel 1. Komposisi kimia dan kekerasan mikro Inconel 600 dan Inconel 625

Material	Ni	Fe	Mn	C	Co	Ti	Cr	Mo	Nb + Ta	HV
Inconel 600	72.0 min	6.00-10.00	1.00 max	0.15			14.0-17.0			166
Inconel 625	58.0	5.00 max	0.50 max	0.10 maz	1.00 max	0.40 max	20.00-23.00	18.00-10.00	3.15-4.15	205



Gambar 1. Bagan peralatan *magnetostrictive-induced cavitation* secara skematik. Dimana: 1. Keran air masuk; 2. Wadah pendingin; 3. Peredam suara; 4. Transduser; 5. Terompet (*horn*); 6. Ujung terompet (*horn tip*); 7. Pemegang sampel (*spesimen holder*); 8. Keran air keluar; 9. Pembangkit ultrasonik (*ultrasonic generator*).[1].

## METODOLOGI

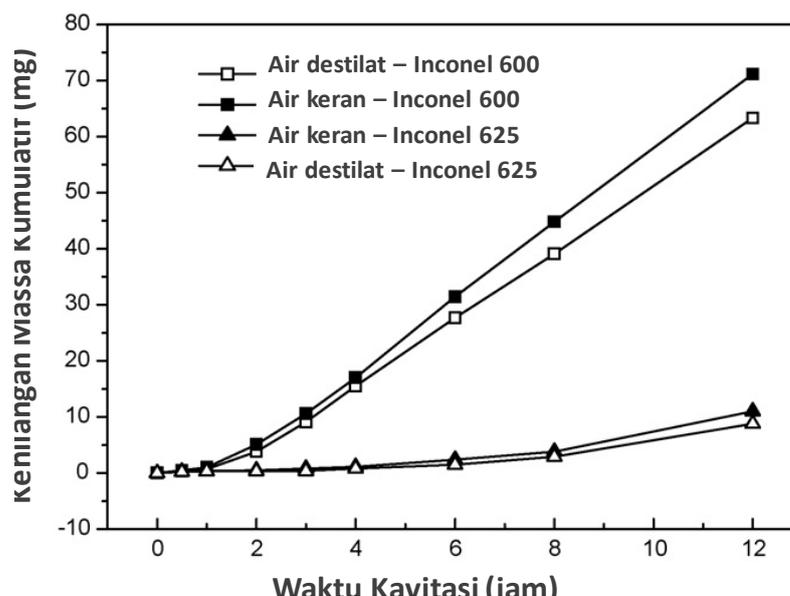
Komposisi kimia dan kekerasan mikro Inconel 600 dan Inconel 625 tertera pada Tabel 1. Pengujian erosi kavitasi menggunakan peralatan *magnetostrictive-induced cavitation* (MIC), Bagan peralatan secara skematik dapat dilihat pada Gambar 1. Frekuensi yang digunakan oleh MIC adalah 20 kHz dengan amplitudo dobel 60  $\mu\text{m}$  dan sesuai standar pengujian ASTM G32-92 [2]. Spesimen dijepit pada ujung terompet sebagai spesimen atas, sedangkan spesimen uji ditempatkan di pemegang spesimen, berada dalam satu sumbu dengan terompet (*horn*) berjarak 0.5 mm dari spesimen atas.

Untuk uji kehilangan massa, spesimen diampas hingga tingkat kekasaran 800 dan untuk observasi SEM, proses ampas spesimen dilanjutkan dan dipolis dengan partikel yang berukuran 1.5  $\mu\text{m}$ . Massa spesimen ditimbang secara interval untuk mendapatkan perubahan massa setelah proses abrasi. Setiap kali sebelum penimbangan, spesimen dibersihkan terlebih dahulu dengan etanol di dalam kolam ultrasonik selama 5 menit, lalu dikeringkan di udara dan akhirnya ditimbang menggunakan timbangan yang mempunyai akurasi 0.1 mg. Data kehilangan massa yang ditampilkan di makalah ini adalah hasil rata-rata penimbangan dari 3 sampel. Morfologi permukaan spesimen dan penampang melintang pada semua interval waktu abrasi diamati oleh *Scanning Electron Microscope* (SEM) dan *Energy Dispersive Spectroscopy* (EDS). Permukaan awal specimen diamati oleh *Optical Microscope* setelah spesimen dietsa dengan *oxalic acid*. Kekasaran permukaan diukur dengan alat uji kekasaran permukaan, sedangkan kekerasan mikro diukur dengan alat uji kekerasan Vickers.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Kehilangan Massa

Dari pengukuran kehilangan massa secara kumulatif, diperoleh hasil yang ditampilkan pada Gambar 2. Keseluruhan proses dari erosi kavitasi Inconel 600 dan Inconel 625 dapat dibagi menjadi 2 (dua) bagian utama, yaitu masa inkubasi (diberi label I) dan masa kenaikan stabil (diberi label II). Pada satu jam pertama proses, kedua paduan kehilangan massa kumulatif naik perlahan menandakan hanya sedikit material yang terlepas dari spesimen. Namun pada masa kedua, kehilangan massa meningkat secara linear dengan berjalannya waktu. Gradien kehilangan massa Inconel 600 sangat tajam dibandingkan dengan Inconel 625. Pada akhir tes 12 jam, kehilangan massa kumulatif Inconel 600 mencapai 71.2 mg, sedangkan Inconel 625 mencapai 11 mg. Ini berarti Inconel 625 hanya kehilangan massa sekitar 1/6 dari Inconel 600. Dari hasil ini, Inconel 625 lebih tahan terhadap kavitasi erosi dibandingkan Inconel 600.

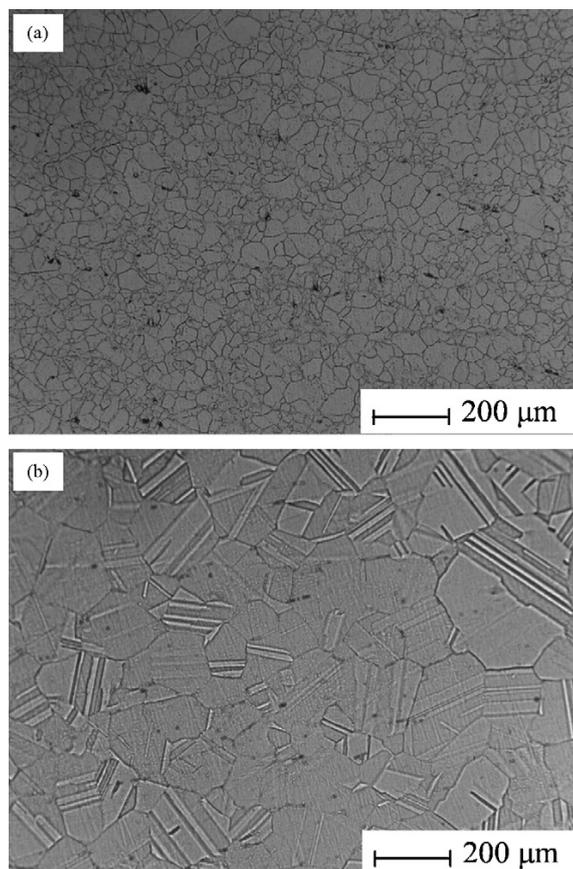


Gambar 2. Kehilangan Massa Kumulatif terhadap Waktu dari Uji Erosi Kavitasi Inconel 600 dan Inconel 625.

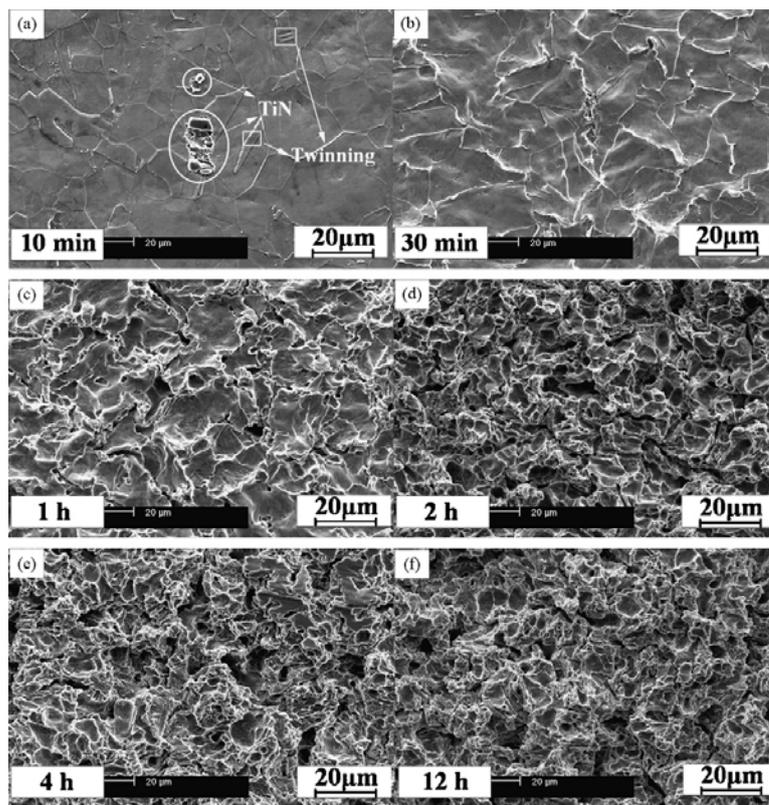
### Morfologi Permukaan

Gambar 3 menampilkan morfologi Inconel 600 dan Inconel 625 setelah etsa sebelum uji erosi kavitasi. Gambar 3a memperlihatkan permukaan dengan butir yang kecil dan halus, sedangkan permukaan Inconel 625 memperlihatkan butir yang lebih besar dan kasar dan terdapat batas butir *twin boundaries* dengan densitas yang lebih tinggi dibandingkan Inconel 600. *Twin boundaries* adalah cacat permukaan yang menghambat pergerakan dislokasi. Cacat ini menyebabkan distorsi dan mengakibatkan naiknya tegangan dalam kisi kristal sehingga menghambat pergerakan dislokasi dan pada akhirnya menaikkan kekerasan dan kekuatan material [6-7].

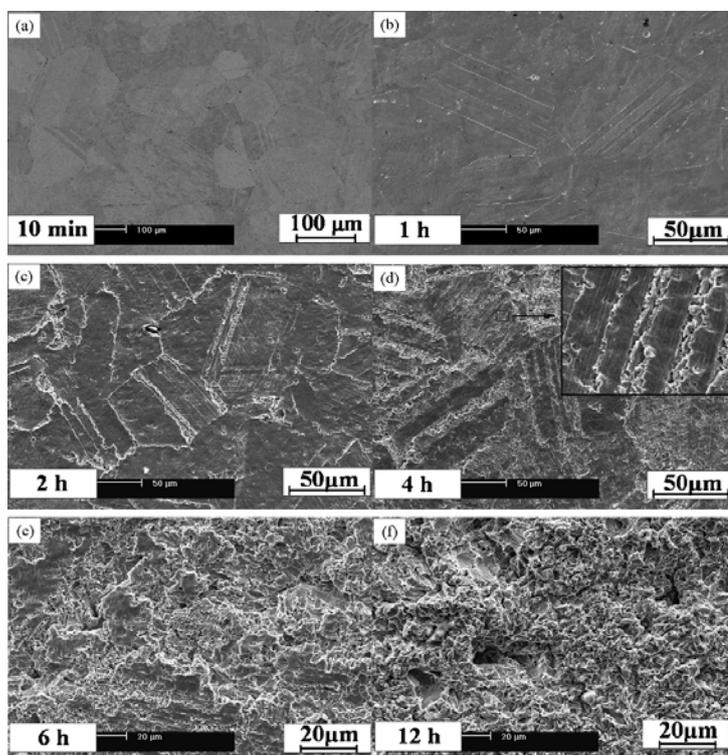
Gambar 4 dan 5 menampilkan permukaan kedua paduan yang diamati dengan SEM pada berbagai interval tes erosi kavitasi. Gambar 4a menunjukkan struktur mikro Inconel 600 dengan *twin boundaries* dan ditemukannya inklusi TiN. Pada 10 menit pertama proses erosi kavitasi, terlihat sedikit deformasi pada permukaan. Sejalan bertambahnya waktu, deformasi terlihat semakin banyak dan dalam. Setelah 1 jam proses, cekungan yang dihasilkan besar dan dangkal lalu semakin lama, cekungan menjadi semakin kecil dan halus namun dalam. Hal ini menandakan uji erosi korosi telah mengangkat material dan melepaskan dari spesimen dari laju lambat menuju laju yang lebih cepat. Gambar 5 menunjukkan struktur mikro Inconel 625 dengan *twin boundaries* yang lebih banyak dan padat dibandingkan Inconel 600. Inconel 625 juga mengalami kerusakan permukaan namun tidak sebanyak Inconel 600. Cekungan yang dihasilkan setelah 12 jam uji erosi kavitasi halus namun tidak sedalam Inconel 600. Hal disebabkan harga kekerasan Inconel 625 (205 HV) yang lebih tinggi daripada Inconel 600 (166 HV) [3-5]. Sifat kekerasan material sangat berperan dalam menahan abrasi suatu fluida. Hal lain adalah densitas *twin boundaries* pada Inconel 625 yang lebih tinggi daripada Inconel 600. *Twin boundaries* adalah cacat permukaan yang menghambat pergerakan dislokasi. Cacat ini menyebabkan distorsi dan mengakibatkan naiknya tegangan dalam kisi kristal sehingga menghambat pergerakan dislokasi dan pada akhirnya menaikkan kekerasan dan kekuatan material [6-7].



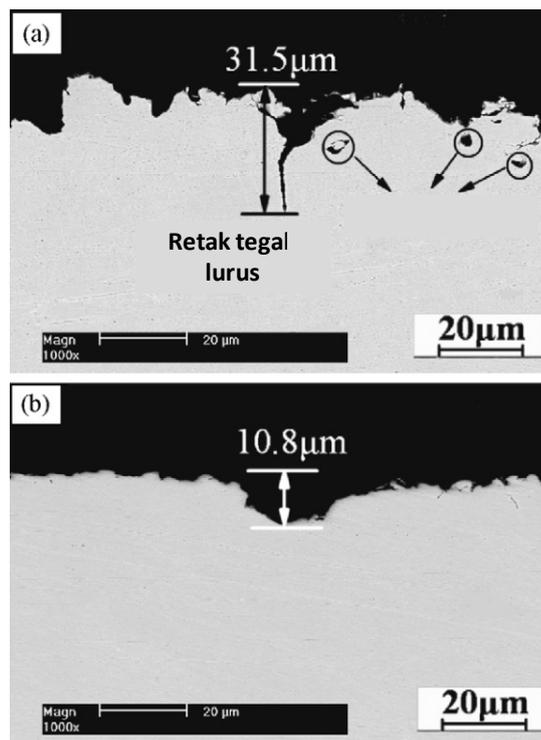
Gambar 3 menampilkan morfologi Inconel 600 dan Inconel 625 setelah etsa sebelum uji erosi kavitasi.



Gambar 4. Struktur mikro Inconel 600 setelah uji erosi korosi selama (a) 10 menit, (b) 30 menit, (c) 1 jam, (d) 2 jam, (e) 4 jam, and (f) 12 jam.

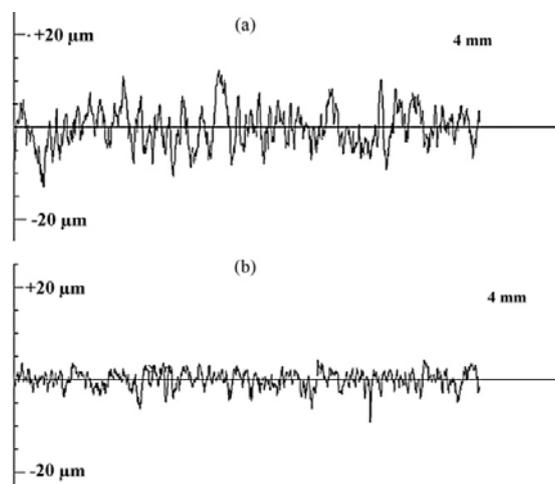


Gambar 5. Struktur mikro Inconel 625 setelah uji erosi korosi selama (a) 10 menit, (b) 30 menit, (c) 1 jam, (d) 2 jam, (e) 4 jam, and (f) 12 jam.



Gambar 6. Penampang melintang setelah uji erosi kavitasi selama 12 jam a) Inconel 600, b) Inconel 625

Gambar 6 adalah penampang melintang Inconel 600 dan Inconel 625 setelah uji erosi kavitasi selama 12 jam. Terlihat bahwa pada Inconel 600 didominasi oleh terbentuknya retak tajam (Gambar 6a), sedangkan pada Inconel 625 hanya terdapat retak pendek dan sumuran dangkal. Retak tajam pada Inconel 625 memiliki panjang 31.5 μm yang berada tegak lurus dengan permukaan. Tipe retakan seperti ini sangat berbahaya dan fatal bagi steam generator, karena retak dapat merambat dengan cepat dan mengakibatkan rusaknya steam generator. Jenis retak lain yang terdapat pada Inconel 600 adalah retak miring. Retak miring ini menjalar ke dalam material. Lain halnya dengan Inconel 625. Penampang melintangnya menunjukkan tinggi permukaan yang hampir sama. Cekungan terdalam yang ditemui sedalam 10.8 μm, dan angka ini bernilai 1/3 dari kedalaman retak Inconel 600. Fakta sekaligus mengkonfirmasi data sebelumnya bahwa kerusakan yang terjadi pada Inconel 600 lebih berat daripada Inconel 625.



Gambar 7. Kekasaran permukaan setelah uji erosi kavitasi selama 12 jam, a) Inconel 600, b) Inconel 625

Gambar 7 adalah data pengukuran kekasaran permukaan Inconel 600 dan Inconel 625 setelah uji erosi kavitasi selama 12 jam. Kekasaran rata-rata Inconel 600 sepanjang garis 4 mm sebesar 3.1  $\mu\text{m}$  sedangkan Inconel 625 sebesar 1.4  $\mu\text{m}$ . Hal ini membuktikan bahwa Inconel 625 lebih tahan terhadap friksi dibanding Inconel 600.

## KESIMPULAN

Ketahanan erosi kavitasi Inconel 600 dan Inconel 625 telah dipelajari dan dihasilkan kesimpulan sebagai berikut;

Kehilangan massa kumulatif dari pengujian erosi kavitasi selama 12 jam memperlihatkan bahwa nilai Inconel 625 adalah 1/6 dari hasil yang diperoleh oleh Inconel 600. Pengukuran kehilangan massa kumulatif Inconel 600 sebesar 71.2 mg, sedangkan Inconel 625 sebesar 11 mg.

Dari pengamatan struktur mikro permukaan Inconel 600 ditemukan terdapat banyak cekungan dan retakan yang dalam, namun berbeda dengan Inconel 625 yang hanya cekungan yang relatif seragam dan sumuran yang dangkal.

Pengukuran kekasaran rata-rata permukaan specimen Inconel 600 menghasilkan 3.1  $\mu\text{m}$  dan Inconel 625 menghasilkan 1.4  $\mu\text{m}$ . Nilai kekerasan dan densitas *twin boundaries* Inconel 625 menjadi sebab naiknya ketahanan erosi kavitasi.

Inconel 625 menunjukkan performa ketahanan erosi kavitasi yang lebih tinggi dibandingkan Inconel 600, sehingga Inconel 625 direkomendasikan menjadi material pipa Generator Uap Reaktor Daya Eksperimental.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada tim detail engineering desain RDE khususnya untuk kegiatan INSINAS kelompok WBS 3. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada tim editor PKSEN yang telah memeriksa tulisan ini untuk menjadi lebih sempurna.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Comparison of Inconel 625 and Inconel 600 in resistance to cavitation erosion and jet impingement erosion, H.X. Hu, Y.G. Zheng, C.P. Qin, Nuclear Engineering and Design 240 (2010) 2721–2730.
- [2] ASTM G32-92, 1992. Standard method of vibratory cavitation erosion test. In: Annual Book of ASTM Standards. ASTM 03.02, Philadelphia.
- [3] Howard, R.L., Ball, A., 1995. The solid particle and cavitation erosion of titanium aluminide intermetallic alloys. Wear 186–187, 123–128.
- [4] Howard, R.L., Ball, A., 1996. Mechanisms of cavitation erosion of TiAl-based titanium aluminide intermetallic alloys. Acta Mater. 44, 3157–3168.
- [5] Thiruvengadan, A., Preiser, H., 1964. Recent investigation of cavitation and cavitation damage. J. Ship Rev. 8, 39.
- [6] A.K. Agrawal, A. Singh, A. Vivek, S. Hansen, G. Daehn, Extreme Twinning and Hardening of 316L from a Scalable Impact Process, Materials Letters (2018), doi: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.04.044>
- [7] H. Somekawa, A. Singh, C.A. Schuh, Effect of twin boundaries on indentation behavior of magnesium alloys, Journal of Alloys and Compounds (2016), doi: 10.1016/j.jallcom.2016.06.267.

Halaman ini sengaja di kosongkan

## PELINDIAN Y HASIL DEKOMPOSISI PASIR SENOTIM MENGGUNAKAN $\text{Na}_2\text{CO}_3$ DAN $\text{NaHCO}_3$

Tri Handini, Wahyu Rachmi Pusparini, Harry Supriadi

Pusat Sains Dan Teknologi Akselerator, BATAN  
Jl. Babarsari Kotak Pos 6101 Ykbb, Yogyakarta 55281  
[handini@batan.go.id](mailto:handini@batan.go.id)

### ABSTRAK

**PELINDIAN Y HASIL DEKOMPOSISI PASIR SENOTIM MENGGUNAKAN  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  DAN  $\text{NaHCO}_3$ .** Telah dilakukan pelindian Y hasil dekomposisi pasir senotim menggunakan  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  dan  $\text{NaHCO}_3$ . Proses ini meliputi pemanggangan pasir senotim dengan pereaksi  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  dan  $\text{NaHCO}_3$  serta proses pelarutan menggunakan HCl. Untuk mengetahui keberhasilan proses pelindian digunakan itrium (Y) sebagai logam representasi logam tanah jarang. Variabel yang mempengaruhi efektivitas dekomposisi antara lain perbandingan berat pasir dengan berat pereaksi, suhu pemanggangan, konsentrasi HCl dan waktu pengadukan. Dari hasil penelitian diperoleh hasil Y terlarut optimum pada perbandingan berat pasir senotim dan berat pereaksi 5 : 1, suhu pemanggangan 800 °C, pelarutan pada konsentrasi HCl 1,5 M dan waktu pengadukan 4 jam. Hasil dekomposisi menggunakan  $\text{NaHCO}_3$  memberikan hasil pelindian Y lebih baik (6,68%) di bandingkan dengan pereaksi  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (6,32%).

Kata kunci: pelindian, dekomposisi, pasir senotim,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{NaHCO}_3$

### ABSTRACT

**LEACHING OF Y DECOMPOSITION RESULTS OF XENOTIME SAND USING  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  AND  $\text{NaHCO}_3$ .** Leaching of Y decomposition results of xenotime sand using  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  and  $\text{NaHCO}_3$  has been carried out. This process includes roasting xenotime sand with  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  and  $\text{NaHCO}_3$  and the dissolution process using HCl. To determine the success of the leaching process used yttrium (Y) as a metal representation of rare earth metals. Variables that influence the effectiveness of decomposition include weight ratio of sand with the weight of reagent, roasting temperature, HCl concentration and stirring time. From the results of the study obtained the results of Y were optimum dissolved on weight ratio of xenotime sand and 5 :1 reagent weight, roasting temperature 800 °C, dissolution at 1.5 M HCl concentration and 4 hours stirring time. Decomposition results using  $\text{NaHCO}_3$  gave Y leaching results better (6.68%) compared to  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  reagent (6.32%).

Keywords: leaching, decomposition, xenotime sand,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{NaHCO}_3$

### PENDAHULUAN

Pada umumnya unsur logam tanah jarang di permukaan bumi tidak berada dalam bentuk yang bebas, melainkan berbentuk mineral yang kompleks bersama - sama mineral lain, seperti senotim, monasit dan gadolinit. Pasir senotim merupakan mineral ikutan dalam endapan timah. Negara yang banyak menghasilkan pasir ini adalah Amerika Serikat, Brasil, India, Malaysia, Thailand dan Indonesia [1].

Pasir senotim mengandung logam tanah jarang berat (*heavy rare earth element*) yaitu Dy, Tb, Yb, Eu, Gd dan Y lebih besar dibandingkan monasit yang mengandung logam tanah jarang ringan (*light rare earth element*) antara lain Ce, Pr, La, Nd dan Sm. Nilai ekonomi produk oksida dan paduan logam LTJ berat ini lebih tinggi dibandingkan LTJ ringan. Demikian pula aplikasi untuk kepentingan komponen teknologi strategis yang mempunyai kemampuan presisi tinggi, misalnya YSZ yang dipakai sebagai katoda pada sel tunam padat untuk energi baru dan terbarukan [2].

Logam tanah jarang penggunaannya sangat luas dalam sains dan teknologi modern. Penggunaan logam tanah jarang berat dan logam tanah jarang ringan dalam industri, terutama untuk konduktor suhu tinggi dan magnet permanen [3]. Itrium (Y) digunakan dalam banyak aplikasi, seperti dalam pembuatan superkonduktor, dalam komposisi fosfor dan

dalam dosimeter thermoluminesen, dalam superalloy nikel dan dalam bahan elektronik dan sel bahan bakar oksida padat [4].

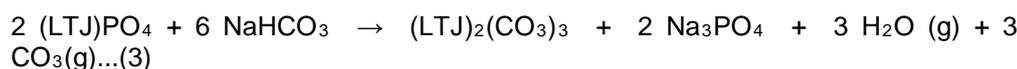
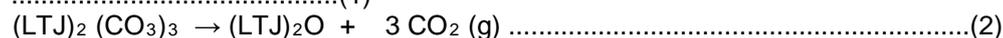
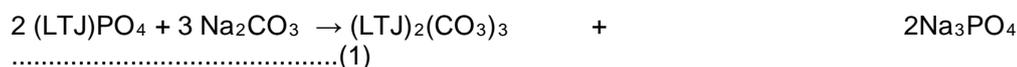
Pasir senotim mempunyai kandungan logam tanah jarang berat (*heavy rare earth element*) yang relatif tinggi, terutama kandungan itrium (Y), maka perlu dicoba diteliti pengolahan pasir tersebut untuk mendapatkan logam-logam tanah jarang secara individual dengan berbagai macam metode, salah satunya dengan metode dekomposisi pasir menggunakan garam tertentu[5].

Unsur-unsur logam tanah jarang merupakan bahan komoditi mineral yang memiliki nilai strategis dan ekonomis, maka perlu adanya upaya untuk mendapatkan logam-logam tersebut dari pasir senotim dengan tingkat kemurnian tinggi. Oleh karena itu perlu dilakukan usaha untuk menghasilkan metode dekomposisi pasir yang efektif, karena proses dekomposisi akan berpengaruh terhadap keberhasilan proses berikutnya.

Dekomposisi merupakan suatu cara untuk menguraikan atau memecah suatu senyawa menjadi senyawa yang lebih sederhana. Metode dekomposisi pasir senotim yang selama ini telah dilakukan adalah metode basah, yaitu dengan menggunakan larutan asam atau basa dengan konsentrasi tertentu. Kedua cara tersebut memerlukan larutan asam atau basa dengan konsentrasi yang relatif tinggi, sehingga dapat menimbulkan resiko korosif pada peralatan [6,7,8].

Ada 2 macam proses dekomposisi pasir senotim yang banyak dilakukan yaitu metode basah dan metode kering [5,6,7]. Dekomposisi metode basah biasanya menggunakan asam sulfat karena senyawa ini mempunyai daya larut dan titik didih yang tinggi. Selain menggunakan asam, pada proses dekomposisi metode basah sering juga digunakan NaOH. Pengerjaannya mirip dengan metode asam sulfat, hanya asamnya di ganti dengan natrium hidroksida. Sedangkan dekomposisi metode kering dikembangkan untuk keperluan dekomposisi bebatuan untuk keperluan analisis kimia. Ada dua langkah utama yang dilakukan dalam proses ini yaitu pemanggangan dan pelarutan [10]. Metode ini dapat menggunakan beberapa macam pereaksi, antara lain alkali florida, natrium karbonat, natrium bikarbonat, alkali hidroksida, kalium sulfat dan lainnya tergantung jenis cuplikan.

Dekomposisi pasir senotim dilakukan dengan tujuan untuk mengambil logam tanah jarang yang terikat dalam pasir. Pereaksi yang dipilih dalam penelitian ini adalah natrium karbonat (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) dan natrium bikarbonat (NaHCO<sub>3</sub>). Keduanya mudah bereaksi membentuk garam karbonat yang mudah larut dalam asam [9]. Reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut:



Pada penelitian ini dilakukan dekomposisi pasir senotim menggunakan metode kering. Untuk mengetahui efektivitas proses dekomposisi metode kering ini digunakan Y sebagai logam representasi untuk logam tanah jarang. Ada dua tahap yang dilakukan, yaitu tahap pertama proses dekomposisi pasir senotim menggunakan pereaksi natrium karbonat dan natrium bikarbonat. Proses kedua adalah proses pelarutan dalam asam klorida. Dalam dua tahap proses tersebut dilakukan dua parameter yang berpengaruh, yaitu pada proses pemanggangan parameternya adalah perbandingan berat pasir senotim dan berat pereaksi, sedangkan dalam proses pelarutan parameter yang dilakukan adalah konsentrasi asam dan waktu pelarutan.

Untuk mengetahui hasil proses digunakan rumus sebagai berikut:

$$\text{Efisiensi} = \frac{\text{massa } Y \text{ terambil}}{\text{massa } Y \text{ dalam umpan}} \times 100 \% \dots\dots\dots(4)$$

**METODOLOGI**

**Bahan yang digunakan**

Bahan kimia yang digunakan adalah Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, NaHCO<sub>3</sub>, HCl semua buatan E-Merck. Pasir senotim dari PT. Timah (dengan komposisi Y = 19,28%, La = 0,39%,

Ce = 2,02%, Nd = 0,74%, Sm = 1,07%, Gd = 2,42%, Dy = 4,20%) dan aquades buatan PSTA.

### Alat yang digunakan

Peralatan gelas laboratorium, timbangan, pengaduk magnet, *furnace*, XRF.

### Cara kerja

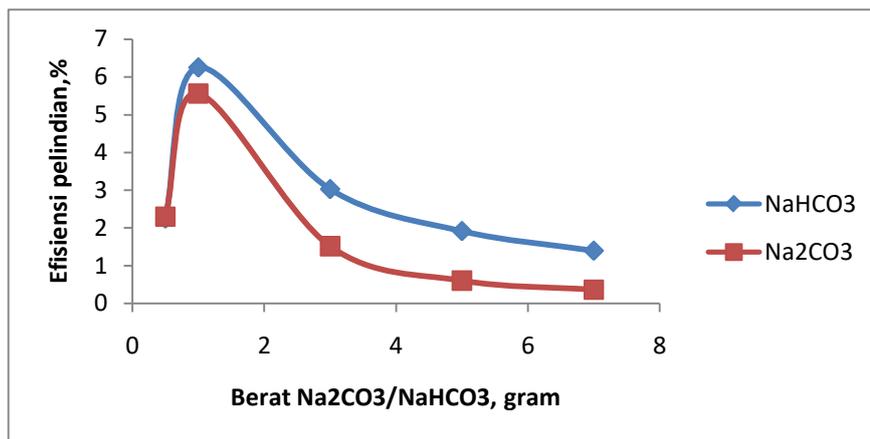
1. Persiapan pasir senotim.  
Pasir senotim digerus dan diayak hingga diperoleh ukuran butir lolos 200 mesh.
2. Optimasi perbandingan berat pasir senotim dengan  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  atau  $\text{NaHCO}_3$ .  
Pasir senotim sebanyak 5 gram dicampur dengan 0,5 gram  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  dipanggang dalam *furnace* pada suhu 800 °C selama 1 jam. Setelah selesai bubuk dilarutkan dalam 40 mL HCl 1,5 M dan diaduk dengan pengaduk magnet selama 3 jam. Kemudian larutan disaring dan filtrat dianalisis kadar itriumnya menggunakan XRF. Pekerjaan ini diulangi dengan memvariasi berat garamnya yaitu 1, 3, 5, dan 7 gram. Pekerjaan ini dilakukan juga untuk garam  $\text{NaHCO}_3$ .
3. Optimasi suhu pemanggangan.  
Pasir senotim sebanyak 5 gram dicampur dengan 1 gram  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  dipanggang dalam *furnace* pada suhu 600 °C selama 1 jam. Setelah selesai bubuk dilarutkan dalam 40 mL HCl 1,5 M dan diaduk dengan pengaduk magnet selama 3 jam. Kemudian larutan disaring dan filtrat dianalisis kadar itriumnya menggunakan XRF. Pekerjaan ini diulangi dengan variasi suhu pemanggangan 700 dan 900 °C. Pekerjaan ini dilakukan juga untuk garam  $\text{NaHCO}_3$ .
4. Optimasi konsentrasi HCl.  
Pasir senotim sebanyak 5 gram dicampur dengan 1 gram  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  dipanggang dalam *furnace* pada suhu 800 °C selama 1 jam. Setelah selesai bubuk dilarutkan dalam 40 mL HCl 0,5 M dan diaduk dengan pengaduk magnet selama 3 jam. Kemudian larutan disaring dan filtrat dianalisis kadar itriumnya menggunakan XRF. Pekerjaan ini diulangi dengan variasi konsentrasi HCl 1, 2, dan 2,5 M. Pekerjaan ini dilakukan juga untuk garam  $\text{NaHCO}_3$ .
5. Pasir senotim sebanyak 5 gram dicampur dengan 1 gram  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  dipanggang dalam *furnace* pada suhu 800 °C selama 1 jam. Setelah selesai bubuk dilarutkan dalam 40 mL HCl 1,5 M dan diaduk dengan pengaduk magnet selama 4 jam. Kemudian larutan disaring dan filtrat dianalisis kadar itriumnya menggunakan XRF. Pekerjaan ini diulangi dengan variasi waktu pelarutan yaitu 5, 6 dan 7 jam. Pekerjaan ini dilakukan juga untuk garam  $\text{NaHCO}_3$ .

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Pasir senotim digerus dan diayak hingga diperoleh ukuran butir lolos 200 mesh, hal ini dimaksudkan agar diperoleh luas muka yang lebih besar sehingga pasir akan terdekomposisi secara optimal. Pasir senotim sebagai umpan dianalisis dan diperoleh kadar Y = 19,28%.

1. Optimasi perbandingan berat pasir senotim dengan  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  atau  $\text{NaHCO}_3$ .  
Tabel 1. Kadar Y terlindi pada perbandingan berat pasir senotim dengan  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  atau  $\text{NaHCO}_3$ .

Berat pereaksi, gram	Kadar Y terlindi, ppm	
	$\text{Na}_2\text{CO}_3$	$\text{NaHCO}_3$
0,5	546,25	534,34
1	1320,50	1484,38
3	361,01	719,63
5	144,88	456,00
7	87,88	332,50



Gambar 1. Hubungan antara berat garam dengan efisiensi pelindian.

Dari Gambar 1 dapat dilihat bahwa penambahan garam Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> atau NaHCO<sub>3</sub> dapat menaikkan jumlah itrium yang terambil. Pada penambahan garam 1 gram (perbandingan berat pasir : garam = 5 : 1) memberikan hasil yang maksimum, dan semakin lama/penambahan garam makin banyak maka hasilnya akan menurun. Hal ini memberikan gambaran bahwa pada berat garam 1 gram tersebut terjadi reaksi yang efektif sehingga itrium yang terambil maksimum. Pada penambahan garam kurang dari 1 gram memberikan hasil yang kurang baik karena itrium yang terdekomposisi hanya sedikit karena jumlah pereaksi kurang, sedangkan pada pemakaian pereaksi berlebihan dimungkinkan banyak panas yang terserap oleh pereaksi sehingga proses dekomposisi kurang sempurna. Panas yang diserap pereaksi digunakan autodekomposisi, dengan persamaan reaksi sebagai berikut:

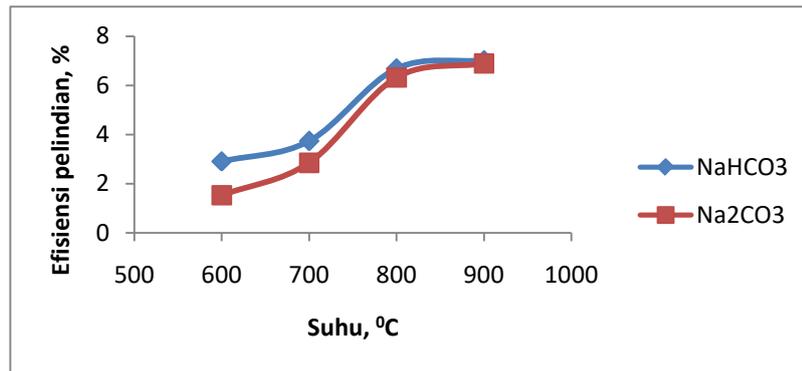


Sehingga pemakaian pereaksi yang berlebihan tidak saja menyebabkan berkurangnya efektifitas panas tetapi juga menyebabkan berkurangnya jumlah pereaksi yang bekerja sebagai reaktan, karena terjadinya proses autodekomposisi. Pada Gambar 1 juga terlihat penggunaan garam Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> lebih rendah dibanding dengan garam NaHCO<sub>3</sub>. Hal ini disebabkan karena garam NaHCO<sub>3</sub> lebih bersifat asam dibandingkan dengan Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> sehingga pada garam NaHCO<sub>3</sub> gugus karbonat lebih reaktif, sehingga lebih reaktif sebagai pereaksi.

## 2. Optimasi suhu pemanggangan.

Tabel 2. Kadar Y terlindi pada suhu pemanggangan dengan pereaksi Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> atau NaHCO<sub>3</sub>.

Suhu pemanggangan, °C	Kadar Y terlindi, ppm	
	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	NaHCO <sub>3</sub>
600	363,38	691,12
700	676,88	885,88
800	1501,00	1586,50
900	1636,37	1667,25



Gambar 2. Hubungan antara suhu pemanggangan dengan efisiensi pelindian

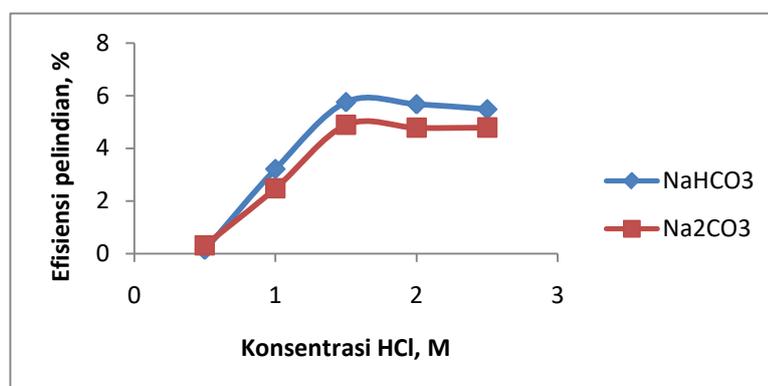
Dari Gambar 2 terlihat bahwa semakin tinggi suhu pemanggangan maka semakin banyak/besar itrium yang terambil. Hal ini disebabkan karena semakin tinggi suhu akan meningkatkan luas permukaan pasir, akibatnya akan meningkatkan efektivitas reaksi pereaksi dengan pasir. Suhu optimal diperoleh pada suhu 800 °C, di bawah suhu tersebut pemanasan belum sempurna sehingga tidak semua itrium terdekomposisi. Sedangkan untuk suhu di atas 800 °C hasil relatif sama, hal ini kemungkinan disebabkan karena itrium telah terdekomposisi semua.

Didied Haryono (2015)[11] melakukan proses *roasting* pasir monasit menggunakan NaOH pada suhu 400 °C diperoleh kandungan LTJ (Ce, Nd dan Yb) sebesar 38,91% dan fosfat terdekomposisi 91,40%. Sedangkan Sri Sukmajaya (2016)[2] melakukan pemisahan logam tanah jarang berat dari pasir senotim menggunakan NaOH ditambah katalis amonium hidrogen fosfat pada suhu 700 °C selama 4 jam diperoleh total logam tanah jarang berat 62,59%.

3. Optimasi konsentrasi HCl.

Tabel 3 Kadar Y terlindi pada pengaruh HCl

HCl, M	Kadar Y terlindi, ppm	
	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	NaHCO <sub>3</sub>
0,5	73,63	33,25
1	589,00	762,37
1,5	1161,38	1365,63
2	1135,25	1346,62
2,5	1137,63	1301,50



Gambar 3. Hubungan antara konsentrasi HCl dengan efisiensi pelindian

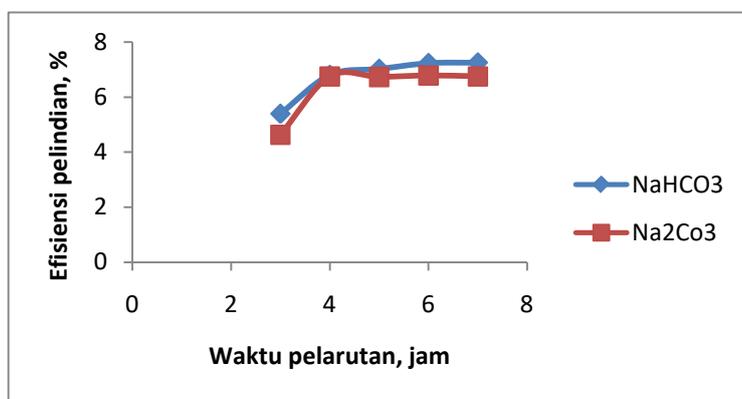
Pada Gambar 3 dapat dilihat bahwa dengan semakin besar konsentrasi HCl yang digunakan akan menyebabkan kenaikan itrium yang terambil. Hal ini karena dengan

semakin besar konsentrasi yang digunakan maka semakin besar pula ion logam tanah jarang yang terlarutkan. Namun setelah konsentrasi 1,5 M terlihat hasil mulai linier karena sistem yang terjadi sudah stabil.

4. Optimasi waktu pelarutan.

Tabel 4. Kadar Y terlindi pada pengaruh waktu pelarutan dengan HCl

Waktu, jam	Kadar Y terlindi, ppm	
	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	NaHCO <sub>3</sub>
3	1099,63	1280,12
4	1603,12	1615,00
5	1598,38	1667,25
6	1610,25	1738,50
7	1603,13	1797,88



Gambar 4. Hubungan antara waktu pelarutan dengan efisiensi pelindian

Dari Gambar 4 terlihat bahwa semakin lama waktu pelarutan maka semakin banyak pula itrium yang terambil. Hal ini karena dengan adanya penambahan waktu maka reaksi yang terjadi akan lebih sempurna. Reaksi yang terjadi pada proses pelarutan ini adalah :



Alasan pemilihan HCl ini karena dari penelitian yang telah dilakukan oleh Franken (1995)[10] yang telah mencoba berbagai media pelarut seperti amonium, thiosianat, thiourea, asam sulfat, asam nitrat dan asam khlorida. Dari berbagai macam media pelarut tersebut ternyata asam khlorida memberikan hasil yang terbaik.

**KESIMPULAN**

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan diperoleh kesimpulan bahwa proses pelindihan Y hasil dekomposisi menggunakan pereaksi NaHCO<sub>3</sub> memberikan hasil yang lebih besar yaitu 6,68% dibandingkan dengan Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 6,32%. Perbandingan berat pasir senotim dengan pereaksi (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> maupun NaHCO<sub>3</sub>) adalah 5 : 1 dan suhu pemanggangan 800 °C merupakan hasil yang optimum pada proses pemanggangan. Dan pada proses pelarutan oksida logam tanah jarang diperoleh kondisi optimum pada konsentrasi HCL 1,5 M. Namun proses dekomposisi dengan pereaksi Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> maupun NaHCO<sub>3</sub> ini kurang efektif karena itrium yang terdekomposisi sangat kecil.

**UCAPAN TERIMA KASIH**

Ucapan terima kasih kepada manajemen PSTA yang telah memberika fasilitas untuk penelitian. Juga kepada Sri Sukmajaya yang telah membantu penelitian ini.

#### DAFTAR PUSTAKA

1. Hartati R.D. dan Rinawati, "Pemisahan Logam Tanah Jarang Dalam Contoh Monasit dan Senotim Dari Tailing Pengolahan Biji Timah Dengan Teknik Membran Cair Berpendukung", Prosiding Temu Ilmiah Jaringan Kerjasama Kimia Indonesia, Yogyakarta 24-25 Juli 2001.
2. Sri Sukmajaya, dkk., "Proses Pemisahan Logam Tanah Jarang Berat Dari pasir Senotim", Prosiding Seminar Penelitian dan Pengolahan Perangkat Nuklir, PSTA BATAN, Surakarta, 2016.
3. Fernando V., Daniela Camargo V., Bento F., Gilbert S., "Characterization of A Rare Earth oxide Obtained From Xenotime Mineral", Material Characterization 58, Brazil, 2007.
4. Mari E. de Vasconcellos, Carlos A., Alcidio A., "Sequential Separation of The Yttrium Heavy Rare Earths By Fractional Hydroxide Precipitation", Journal of Alloys and Compounds 374, Brazil, 2004.
5. CUTHBERT, F.L., "Thorium Production Technology", NLCO, Addison Wesley Publishing Co., Inc., USA, 1958.
6. PRAKASH SATYA, "Advanced Chemistry of Rare Earth Element", 4<sup>th</sup> ed, S. Chand & Co (PVT) Ltd., New Delhi, 1975.
7. DWI BIYANTORO, dkk., "Pengambilan Y, La, Ce, dan Nd Dari Hasil Digesti Pasir Monasit", Prosiding Pranata Nuklir I, P3TM BATAN, Yogyakarta, 1991.
8. SJAHMINAN, dkk., "Pengolaha bijih Asal Rirang, Digesti Cara Basa", Prosiding Seminar Pranata Nuklir PPBGN BATAN, Jakarta, 1997.
9. JEFFERY, P.G., et al, "Chemical Methods of Rock Analysis", Vo;. 4, Pergamon Press, Oxford, 1989.
10. FRANKEN, K.M., "A Roast Leach Process for Extraction of Rare Earth from Complex Monazite-Xenotime Concentrates", Separation Science and Technology, London, 1995.
11. DIDIED, H., dkk, "Proses *Roasting* Pasir Monasit Dari Kepulauan Bangka Belitung dengan NaOH Padat Menggunakan *Muffle Furnace*", Jurnal, Untirta, 2015.

Halaman ini sengaja di kosongkan

## SIMULASI PRODUKSI $^{99}\text{Mo}$ PADA REAKTOR HOMOGEN CAIR MENGUNAKAN PROGRAM KOMPUTER MCNP6

Arif Isnaeni

P2STPIBN – BAPETEN

email: a.isnaeni@bapeten.go.id

### ABSTRAK

**SIMULASI PRODUKSI  $^{99}\text{Mo}$  PADA REAKTOR HOMOGEN CAIR MENGGUNAKAN PROGRAM KOMPUTER MCNP6.** Nuklida  $^{99m}\text{Tc}$  adalah radioisotop yang sangat bermanfaat dalam prosedur diagnostik kedokteran nuklir.  $^{99m}\text{Tc}$  dihasilkan dari peluruhan  $^{99}\text{Mo}$ . Saat ini sebagian besar  $^{99}\text{Mo}$  diproduksi dengan iradiasi  $^{235}\text{U}$  dalam reaktor nuklir.  $^{99}\text{Mo}$  sebagian besar adalah hasil fisi target iradiasi  $^{235}\text{U}$  dengan persentasi hasil fisi sekitar 6,1%. Sebagian kecil  $^{99}\text{Mo}$  dihasilkan dari aktivasi neutron  $^{98}\text{Mo}$ . Sistem produksi  $^{99}\text{Mo}$  dalam reaktor homogen menawarkan metode yang lebih baik, karena semua  $^{99}\text{Mo}$  dapat diekstraksi dari larutan bahan bakar. Larutan bahan bakar reaktor pada awalnya terdiri dari uranyl nitrat dilarutkan dalam air. Tidak ada pemisahan target dan bahan bakar di reaktor homogen, tidak ada bahan bakar bekas yang dihasilkan dari reaktor ini. Pada penelitian ini akan dilakukan simulasi produksi  $^{99}\text{Mo}$  pada reaktor homogen menggunakan program komputer MCNP6, untuk mengetahui jumlah produksi  $^{99}\text{Mo}$  dengan menggunakan reaktor homogen. Produksi  $^{99}\text{Mo}$  meningkat dan kemudian mencapai titik jenuh pada hari ke-15 operasi reaktor sebesar  $10^4$  Ci. Dari grafik peluruhan diperoleh aktivitas  $^{99}\text{Mo}$  sebesar  $2.2 \times 10^3$  6-day Ci.

Kata kunci:  $^{99}\text{Mo}$ , uranyl nitrat, reaktor homogen, MCNP6.

### ABSTRACT

**$^{99}\text{Mo}$  PRODUCTION SIMULATION OF AQUEOUS HOMOGENEOUS REACTOR USING MCNP6 COMPUTER CODE.**  $^{99m}\text{Tc}$  is very useful radioisotope in nuclear medicine diagnostic procedure.  $^{99m}\text{Tc}$  is produced from  $^{99}\text{Mo}$  decay. Currently, most of  $^{99}\text{Mo}$  is produced by irradiating  $^{235}\text{U}$  in the nuclear reactor.  $^{99}\text{Mo}$  is mostly results of  $^{235}\text{U}$  target fission reaction with a fission yield about 6.1%. Small amount of  $^{99}\text{Mo}$  is created from  $^{98}\text{Mo}$  neutron activation.  $^{99}\text{Mo}$  production system in the aqueous homogeneous reactor offers a better method, because all of the  $^{99}\text{Mo}$  can be extracted from the fuel solution. Fresh reactor fuel solution consists of uranyl nitrate dissolved in water. There is no separation of target and fuel in aqueous homogeneous reactor, the target and fuel become one liquid solution, there is no spent fuel generated from this reactor. In this research was  $^{99}\text{Mo}$  production simulation on homogeneous reactor using MCNP6 computer code to know the amount of  $^{99}\text{Mo}$  production by using homogeneous reactor. Production of  $^{99}\text{Mo}$  was increasing and then reached saturation on the 15<sup>th</sup> day of reactor operation with amount  $10^4$  Ci. From the decay graph obtained  $^{99}\text{Mo}$  activity of  $2.2 \times 10^3$  6-day Ci.

Keyword:  $^{99}\text{Mo}$ , uranyl nitrate, homogeneous reactor, MCNP6.

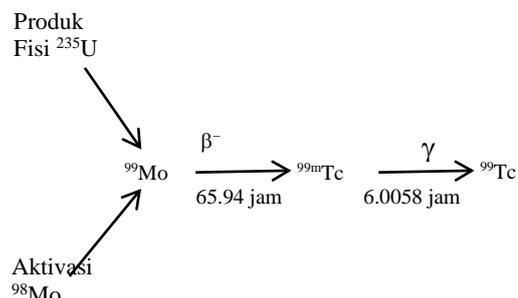
### PENDAHULUAN

Radioisotop  $^{99m}\text{Tc}$  sangat bermanfaat dalam prosedur diagnostik medis,  $^{99m}\text{Tc}$  digunakan pada hampir 80% dari seluruh prosedur kedokteran nuklir [1].  $^{99m}\text{Tc}$  dihasilkan dari peluruhan  $^{99}\text{Mo}$ , karena umur paronya yang pendek dari  $^{99m}\text{Tc}$  (6,0058 jam) kita tidak mengirim  $^{99m}\text{Tc}$  ke rumah sakit di seluruh dunia, tapi kita mengirim  $^{99}\text{Mo}$  yang memiliki umur paro lebih panjang (65,94 jam). Total produksi dan penggunaan  $^{99}\text{Mo}$  di seluruh dunia adalah sekitar 400 TBq / minggu [2]. Permintaan global untuk  $^{99m}\text{Tc}$  akan terus meningkat dengan peningkatan rata-rata 3-8% [3].

Pengayaan Uranium turun dari ~ 90% menjadi ~19.8% mengakibatkan perlunya modifikasi pada proses operasi untuk mengkompensasi penurunan  $^{99}\text{Mo}$  yang dihasilkan [4]. Penurunan pengayaan Uranium dikarenakan oleh perjanjian non-proliferasi nuklir.

Saat ini sebagian besar  $^{99}\text{Mo}$  diproduksi di reaktor riset dan reaktor produksi isotop dengan metode iradiasi target yang mengandung bahan fisil  $^{235}\text{U}$  diperkaya [5].  $^{99}\text{Mo}$  diekstraksi menggunakan proses asam [6], proses ini menghasilkan limbah.  $^{99}\text{Mo}$  sebagian besar dihasilkan oleh reaksi fisi target  $^{235}\text{U}$  dengan persentase jumlah atom hasil fisi sekitar

6,1%. Sebagian kecil itu dihasilkan dari aktivasi neutron  $^{98}\text{Mo}$ ,  $^{98}\text{Mo}$  dihasilkan dari reaksi fisi target  $^{235}\text{U}$ .



Gambar 1. Produksi  $^{99}\text{Mo}$

Sistem produksi  $^{99}\text{Mo}$  dalam reaktor homogen merupakan metode yang efektif, karena semua  $^{99}\text{Mo}$  dapat diekstraksi dari larutan bahan bakar reaktor. Salah satu reaktor homogen yang telah dibangun, reaktor tersebut dioperasikan hampir setiap hari sebagai sumber neutron dari tahun 1951 sampai penonaktifan pada tahun 1974, 23 tahun operasi yang aman dan handal [7]. Larutan bahan reaktor terdiri dari uranil nitrat yang dilarutkan dalam air. Tidak ada pemisahan target dan bahan bakar di reaktor homogen, target dan bahan bakar menjadi satu kesatuan larutan cair, sehingga tidak ada bahan bakar bekas yang dihasilkan dari reaktor ini, setelah ekstraksi  $^{99}\text{Mo}$  dari larutan bahan bakar reaktor, sisa ekstraksi akan dikembalikan ke teras reaktor sebagai larutan bahan bakar.

Beberapa kelebihan dari reaktor homogen untuk produksi isotop kedokteran nuklir adalah biaya yang rendah, massa kritis kecil (daya rendah), penanganan bahan bakar sederhana, karakteristik pengolahan dan pemurnian, dan keselamatan pasif yang melekat [8]. Volume void yang diciptakan oleh gelembung di larutan bahan bakar akan memberikan reaktivitas umpan balik negatif yang kuat [9].

Pada penelitian ini akan dilakukan simulasi produksi  $^{99}\text{Mo}$  pada reaktor homogen menggunakan program komputer MCNP6, untuk mengetahui jumlah produksi  $^{99}\text{Mo}$  dengan menggunakan reaktor homogen.

## METODOLOGI

Berikut parameter reaktor dalam penelitian ini:

Tabel 1. Parameter Teras Reaktor

Parameter	Nilai
Daya Reaktor (termal)	200 kW
Bahan Bakar	Uranil Nitrat
Pengayaan	19,75 %
Diameter Teras (cm)	30
Temperatur Bahan Bakar (K)	300
Tinggi Reaktor (cm)	100
Bejana Reaktor	Baja nirkarat-304
Tebal Bejana (cm)	0.5
Reflektor (radial)	Berilium
Ketebalan Reflektor (cm)	30

Tabel 2. Baja nirkarat-304 [10]

Nuklida	atom/barn.cm
Chromium	$1.74 \times 10^{-2}$
Manganese	$1.52 \times 10^{-3}$
Iron	$5.81 \times 10^{-2}$

Nickel 8.51 × 10<sup>-3</sup>

**Perhitungan kerapatan atom bahan bakar:**

Suatu atom dapat terdiri dari beberapa isotop. Perbedaan massa isotop dapat mempengaruhi massa atom rata-rata, dijelaskan pada persamaan [11]:

$$A = \left[ \frac{wf_1}{A_1} + \frac{wf_2}{A_2} + \dots + \frac{wf_i}{A_i} \right]^{-1}$$

Dimana :

$A$  = massa atom rata-rata (gr/mol)

$wf_1$  = fraksi berat isotop 1

$wf_2$  = fraksi berat isotop 2

$wf_i$  = fraksi berat isotop i

$A_1$  = massa atom isotop 1

$A_2$  = massa atom isotop 2

$A_i$  = massa atom isotop i

Jika diketahui suatu isotop memiliki densitas  $\rho$  (gr/cc) dan massa isotop  $A$  (gr/mol), maka densitas atom dinyatakan dengan persamaan [11]:

$$N = \frac{\rho N_A}{A}$$

Dimana :

$N$  = densitas atom (atom/cc)

$\rho$  = densitas material (gr/cc)

$N_A$  = bilangan Avogadro  
= 6,02×10<sup>23</sup> (atom/mol)

$A$  = massa atom (gr/mol)

Fraksi atom dapat dihitung menggunakan rumus berikut [11]:

$$af_i = wf_i \times \frac{\bar{A}}{A_i}$$

Dimana

$af_i$  = fraksi atom isotop i

$wf_i$  = fraksi berat isotop i

$\bar{A}$  = berat atom rerata (g/mol)

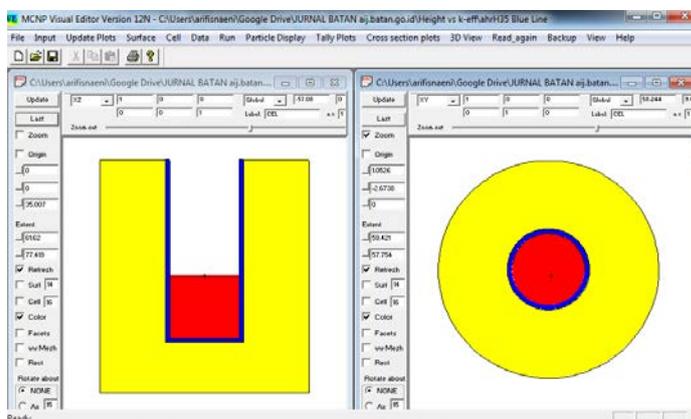
$A_i$  = fraksi berat atom isotop i (g/mol)

Tabel 3. Densitas atom bahan bakar baru.

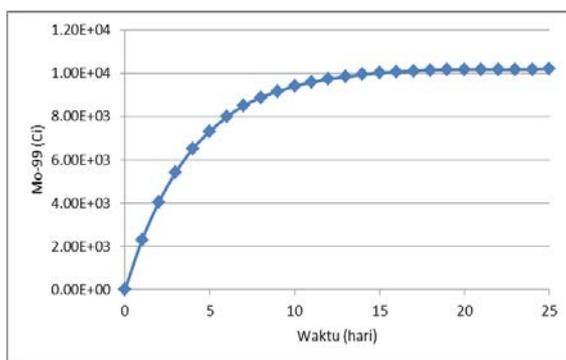
Isotop	atom/barn.cm
<sup>235</sup> U	1.26504531144E-04
<sup>238</sup> U	5.07525204789E-04
<sup>16</sup> O	3.34878465916E-02
<sup>14</sup> N	1.26805947187E-03
<sup>1</sup> H	5.68312174084E-02

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

Model geometri reaktor dapat dilihat pada Gambar 2:

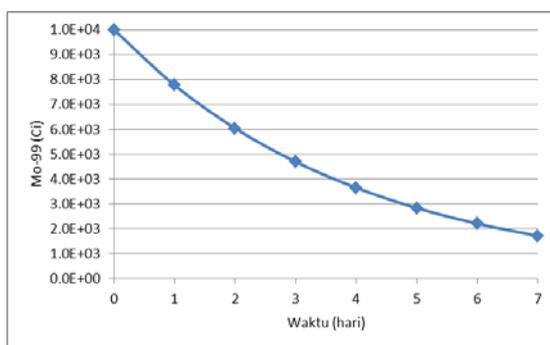


Gambar 2. Model geometri reaktor, irisan reaktor dari samping (kiri) dan dari atas (kanan). Reaktor terdiri atas larutan uranil nitrat dalam air (merah), bejana reaktor (biru), reflektor berilium (kuning).



Gambar 3. Total produksi <sup>99</sup>Mo di dalam teras reaktor.

Pada Gambar 3 dapat dilihat bahwa produksi <sup>99</sup>Mo meningkat dan kemudian mencapai titik jenuh pada hari ke-15. hal ini dikarenakan laju produksi <sup>99</sup>Mo sama dengan laju peluruhan <sup>99</sup>Mo. Titik jenuh terjadi pada total produksi <sup>99</sup>Mo sebesar 10<sup>4</sup> Ci.



Gambar 4. Grafik peluruhan Mo-99

Apabila <sup>99</sup>Mo diekstrak pada hari ke-15 maka didapatkan <sup>99</sup>Mo dengan aktivitas 10<sup>4</sup> Ci. Setelah itu aktivitas <sup>99</sup>Mo akan meluruh secara eksponensial, Aktivitas <sup>99</sup>Mo ditunjukkan pada Gambar 4.

Grafik peluruhan tersebut dapat digunakan untuk memperkirakan aktivitas <sup>99</sup>Mo pada hari tertentu setelah proses ekstaksi dari larutan bahan bakar. Sebagaimana diketahui <sup>99</sup>Mo

memiliki waktu paruh 65,94 jam. Sehingga dengan menggunakan grafik peluruhan maka diperoleh aktivitas  $^{99}\text{Mo}$  sebesar  $2.2 \times 10^3$  6-day Ci.

### KESIMPULAN

Telah dilakukan simulasi produksi  $^{99}\text{Mo}$  pada reaktor homogen (*aqueous homogeneous reactor*) menggunakan program komputer MCNP6. Bahan bakar yang digunakan adalah uranil nitrat. Produksi  $^{99}\text{Mo}$  meningkat dan kemudian mencapai titik jenuh pada hari ke-15. hal ini dikarenakan laju produksi  $^{99}\text{Mo}$  sama dengan laju peluruhan  $^{99}\text{Mo}$ . Titik jenuh terjadi pada total produksi  $^{99}\text{Mo}$  sebesar  $10^4$  Ci. Dari grafik peluruhan diperoleh aktivitas  $^{99}\text{Mo}$  sebesar  $2.2 \times 10^3$  6-day Ci.

### DAFTAR PUSTAKA

1. AMANDA J. YOUKER, ET AL., "A Solution-Based Approach for  $^{99}\text{Mo}$  Production: Considerations for Nitrate versus Sulfate Media, Science and Technology of Nuclear Installations", Sci. Technol. Nucl. Install. 2013:p.1, 2013.
2. B.L. ZHUIKOV, "Production of Medical Radionuclides in Russia: Status and Future. A Review, Applied Radiation and Isotopes", Appl. Radiat. Isot. 84:p.48, 2013.
3. ANONYMOUS, "Non-HEU Production Technologies for Molybdenum-99 and Technetium-99m", IAEA Nuclear Energy Series No. NF-T-5.4, Vienna, 2013
4. ABDEL-HADI ALI SAMEH, "Production Cycle for Large MCNP6 Fission  $^{99}\text{Mo}$  Separation by the Processing of Irradiated LEU Uranium Silicide Fuel Element Targets, Science and Technology of Nuclear Installations", Sci. Technol. Nucl. Install. 2013:p.1, 2013.
5. TAYYABMAHMOOD, MASOODIQBAL, "Optimization study and neutronic design calculations of LEU fuelled homogeneous aqueous solution nuclear reactors for the production of short lived fission product isotopes", Ann. Nucl. Energy 42:p.175, 2012.
6. CATHERINE K. W. CHEUNG, ET AL., "The Intermediate Level Liquid Molybdenum-99 Waste Treatment Process at the Australian Nuclear Science and Technology Organization", Procedia Chem. 7:p.548, 2012.
7. A.G. BUCHAN, ET AL., "Simulated transient dynamics and heat transfer characteristics of the water boiler nuclear reactor – SUPO – with cooling coil heat extraction", Ann. Nucl. Energy. 48:p.68, 2012.
8. ANONYMOUS, "Homogeneous Aqueous Solution Nuclear Reactors for the Production of  $^{99}\text{Mo}$  and other Short Lived Radio isotopes", IAEA – TECDOC – 1601, Vienna (2008).
9. YUNZHAO LI, ET AL., "FMSR: A code system for in-core fuel management calculation of aqueous homogeneous solution reactor", Nucl. Eng. Des. 240:p.763, 2009.
10. BHUIYAN, S.I, M. ET AL., "ANISN – A Multigroup Discrete Ordinates Transport Code with Anisotropic Scattering and Its Use in Reactor Physics", Institute of Nuclear Science and Technology Atomic Energy Research Establishment, Dhaka, 1987.
11. HARMON, CHARLES D., ROBERT D. BUSCH, ET ALL, "Criticality Calculations with MCNP: A Primer", The University of New Mexico, Albuquerque, 1994.

Halaman ini sengaja di kosongkan

## PROSPEK TORIUM SEBAGAI BAHAN BAKAR NUKLIR MASA DEPAN DI INDONESIA: KAJIAN ASPEK GEOLOGI

Ngadenin<sup>\*)</sup>, Heri Syaeful<sup>\*)</sup>, I Gde Sukadana<sup>\*)</sup>, Fd. Dian Indrastomo<sup>\*)</sup>

<sup>\*)</sup> Pusat Teknologi Bahan Galian Nuklir – Badan Tenaga Nuklir Nasional

Jalan Lebak Bulus Raya No.9 Jakarta 12440

Email : [ngadenin@batan.go.id](mailto:ngadenin@batan.go.id)

### ABSTRAK

**PROSPEK TORIUM SEBAGAI BAHAN BAKAR NUKLIR MASA DEPAN DI INDONESIA: KAJIAN ASPEK GEOLOGI.** Uranium adalah bahan bakar untuk pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) pada saat ini dan torium berpotensi menjadi bahan bakar nuklir masa depan. Pemanfaatan torium sebagai bahan bakar nuklir diperkirakan akan dilaksanakan setelah 2020. Saat ini penelitian dan pengembangan pembangkit listrik tenaga nuklir berbasis torium skala pilot sedang dilaksanakan di beberapa negara Eropa, Amerika dan Asia. Torium merupakan unsur yang terdapat dalam beberapa mineral ikutan pada beberapa cebakan mineral seperti cebakan timah, bauksit dan logam tanah jarang. Mineral ikutan pada cebakan mineral tersebut umumnya adalah monasit. Penelitian ini bertujuan untuk memberikan gambaran secara umum tentang prospek torium di Indonesia, terutama untuk pengembangan bahan bakar nuklir di masa depan karena di Indonesia terdapat banyak tambang timah dan bauksit, selain itu juga terdapat cebakan logam tanah jarang. Hasil survei pendahuluan di beberapa wilayah di Indonesia memperlihatkan bahwa keterdapatan monasit pada tambang timah primer adalah 5,07%, tambang timah sekunder adalah 7,57 %, tambang bauksit adalah 1,8 % (kadar torium 4.210 ppm), sedangkan kadar torium pada cebakan logam tanah jarang adalah 86,9 ppm – 11,10%. Pelamparan cebakan timah, bauksit dan cebakan logam tanah jarang cukup luas. Cebakan timah terdapat di sepanjang zona granit jalur timah dari kepulauan Riau hingga Bangka Belitung. Cebakan bauksit terdapat di zona granit jalur timah Kepulauan Riau dan zona jalur granit Kalimantan Barat. Cebakan logam tanah jarang terdapat di Kabupaten Mamuju Sulawesi Barat. Data keterdapatan monasit atau torium pada beberapa tambang atau cebakan mineral di Indonesia serta luas pelamparannya mengindikasikan bahwa prospek torium di Indonesia dianggap cukup bagus.

Kata kunci: torium, monasit, timah, bauksit, logam tanah jarang

### ABSTRACT

**THE PROSPECT OF THORIUM AS THE FUTURE NUCLEAR FUEL IN INDONESIA: GEOLOGICAL ASPECT STUDY.** Uranium is a fuel for nuclear power plants at this time and thorium has the potential to become a future nuclear fuel. Utilization of thorium as a nuclear fuel is expected to take place after 2020. Currently research and development of pilot scale thorium-based nuclear power plants is being carried out in several European, American and Asian countries. Thorium is an element found in some of the accessories minerals in several mineral deposits such as tin, bauxite and rare earth elements deposits. Minerals accessories in the mineral deposits are generally monazite. This study aims to provide a general description of the prospect of thorium in Indonesia, especially for the development of nuclear fuel in the future because in Indonesia there are many tin and bauxite mines, besides that there are also rare earth elements deposits. Result of the preliminary survey in several regions in Indonesia showed that monazite availability in primary tin mines was 5.07%, secondary tin mines were 7.57%, bauxite mines were 1.8% (thorium contents 4,210 ppm), and thorium content in rare earth elements deposits is 86.9 ppm to 11.10%. The overlay of tin and bauxite and rare earth elements deposits is quite extensive. Tin deposits are located along the zone of granite tin belt from the Riau to Bangka Belitung archipelago. The bauxite deposits is located in the zone of granite tin belt in Riau Islands and West Kalimantan. Rare earth elements deposits located in the area of Mamuju Regency, West Sulawesi. Data occurrences of the monazite or thorium in some mines or mineral deposits in Indonesia and the extent of their dispersion indicate that the prospect of thorium in Indonesia is considered to be quite good.

Keywords: thorium, monazite, lead, bauxite, rare earth metals

## PENDAHULUAN

### Status PLTN berbasis Torium di Dunia saat ini

Torium adalah unsur kimia logam dengan radioaktif lemah mempunyai simbol Th, nomor atom 90 dan berat atom 232. Torium ditemukan pada tahun 1829 oleh ahli mineral Norwegia bernama Morten Thrane Esmark. Penamaan torium dilakukan oleh kimiawan Swedia Jons Jacob Berzelius. Torium diambil dari kata Thor yaitu dewa petir. Torium memiliki waktu paruh 14,05 miliar tahun, ia meluruh sangat lambat melalui peluruhan alfa, memulai rantai peluruhan seri torium yang berakhir pada 208Pb stabil. Torium ditemukan dalam jumlah kecil di sebagian besar batuan, sekitar tiga kali lebih banyak daripada uranium. Saat ini torium digunakan untuk refraktori, lampu, dan paduan aerospace. Di Indonesia saat ini torium digunakan sebagai bahan untuk pembuatan kaos lampu petromaks. Pemanfaatan torium sebagai bahan bakar nuklir di dunia diperkirakan akan dilaksanakan setelah tahun 2020. Tenaga nuklir berbasis torium belum sepenuhnya dikomersialkan meskipun banyak reaktor dirancang untuk mengevaluasi penggunaan torium sebagai bahan bakar reaktor. Penelitian dan pengembangan pembangkit listrik tenaga nuklir berbasis torium skala pilot saat ini sedang dilakukan di beberapa negara seperti India, Amerika Serikat, Inggris, Kanada, Jerman, Jepang, Belanda, Norwegia, Rusia, Swedia dan Swiss [1].

### Status Sumber Daya Torium Dunia Saat ini

Perkiraan sumberdaya torium global di dunia adalah sekitar 6,4 juta ton (tabel 1) [2] dari berbagai kategori. Sumberdaya tersebut berasal dari cebakan logam tanah jarang (LTJ), cebakan pasir mineral berat ilmenit, rutil, monasit dan zirkon. Sumberdaya torium terbesar yang teridentifikasi berasal dari India, Brasil, AS, Mesir, Turki, Afrika Selatan, Cina, Rusia.

Tabel 1. Perkiraan Jumlah Sumber Daya Torium di Dunia [2]

Region	Negara	Sumber Daya Torium (ton)	Region	Negara	Sumber Daya Torium (ton)
Eropa	Turki	374.000	Afrika	Mesir*	380.000
	Norwegia	87.000		Afrika Selatan	148.000
	Denmark	86.000 – 93.000		Maroko*	30.000
	Finlandia	60.000		Nigeria*	29.000
	Rusia	55.000		Madagaskar*	22.000
	Swedia	50.000		Angola*	10.000
	Perancis	1000		Mozambik	10.000
	Total Eropa	713.000 – 720.000		Malawi*	9.000
Asia	CIS *(Commonwealth of independent state tidak termasuk federasi Rusia)	1.500.000	Kenya*	8.000	
	Kazaktan	> 50.000	Kongo*	2.500	
	Asia (bagian dari Federasi Rusia )	>100.000 n	Lain-lain*	1.000	
	Uzbekistan	5.000 – 10.000	Total Afrika	649.500	
	India	846.5000	Amerika	AS	598.000
	China (termasuk China Taipei 9.000 ton)	>100.000		Brasil	632.000
	Iran*	30.000		Venezuela*	300.000
	Malaysia	18.000		Kanada	172.000
	Thailand*	10.000		Peru	20.000
	Vietnam*	5.000 – 10.000		Uruguay	3.000
	Korea Selatan*	6.000		Argentina	1.300
	Srilangka*	4.000	Total	1.726.300	
	Total Asia	>2.647.500 – 2.684.500	Amerika	595.000	
Catatan : * data tahun 2013			Australia	595.000	
			Total Dunia	6.358.300 – 6.375.300	

### **Kelebihan Torium sebagai Bahan Bakar Nuklir dibanding Uranium [3]**

Beberapa kelebihan torium dibandingkan dengan uranium sebagai sumber bahan bakar nuklir adalah sebagai berikut :

- a. Jumlah torium di permukaan bumi sekitar 4 kali lebih banyak dibanding uranium
- b. Torium mudah didapat karena secara umum merupakan produk ikutan dari komoditas tambang lain, misalnya produk ikutan dari tambang REE, titanium, timah putih.
- c. Produk limbah bahan bakar bekas dari fisi torium bukanlah jenis yang digunakan dalam persenjataan nuklir (pembangkit listrik uranium menghasilkan plutonium)
- d. Bahan bakar yang dikonsumsi torium mengandung unsur radioaktif yang lebih sedikit dan lebih kecil volume dan massanya dibanding limbah nuklir uranium konvensional.
- e. Siklus bahan bakar torium menyediakan cara yang efisien mengurangi stok plutonium yang ada dengan menggunakan plutonium untuk memulai reaksi berantai fisi torium.

### **Tujuan Penelitian**

Penelitian ini bertujuan untuk memberikan gambaran awal tentang keberadaan torium pada cebakan mineral bijih di Indonesia yang dapat digunakan sebagai bahan pertimbangan dalam perencanaan pengembangan bahan bakar nuklir berbasis torium di masa depan.

### **GEOLOGI CEBAKAN TORIUM**

Secara geologi torium dijumpai dalam beberapa cebakan mineral atau terdapat dalam batuan tertentu. Cebakan mineral yang mengandung torium adalah cebakan timah dan bauksit sedangkan batuan yang mengandung torium yang cukup signifikan adalah batuan karbonatit dan batuan beku alkali.

### **Torium pada Cebakan Timah**

Torium pada cebakan plaser umumnya terdapat pada mineral monasit sebagai mineral ikutan pada konsentrat pasir timah dan konsentrat mineral berat lainnya. Cebakan plaser adalah cebakan sedimenter yang terbentuk karena sifat mineral sebagai mineral berat mempunyai berat jenis lebih besar 2,7 terakumulasi dengan pasir, lanau, lempung di lingkungan aluvial dan pantai. Secara lokal konsentrat mineral berat dapat merupakan konsentrat yang bernilai ekonomis. Cebakan model konsentrat mineral berat berukuran pasir ini adalah penopang utama untuk industri titanium yang diproduksi dari ilmenit, rutil dan leokosen (alterasi ilmenit). Cebakan tipe ini juga merupakan sumber utama dari produksi zirkon. Produk lainnya dari cebakan ini adalah silimanit/kianit, staurolit, LTJ, torium dan monasit. Monasit adalah mineral paling berat dalam kelompok mineral berat dan keberadaannya dominan pada konsentrat pasir mineral berat LTJ dan torium. Monasit terutama berasal dari proses erosi batuan beku dan metamorfosa derajat tinggi. Monasit resisten terhadap pelapukan kimia dan fisika oleh karena itu monasit dapat terendapkan di lingkungan sungai maupun pantai. Beberapa negara produksi monasit di dunia adalah Australia, Brasil, China, Indonesia, Korea, Malaysia, New Zealand, Srilangka, Thailand, Zaire dan USA. Monasit berasal terutama dari tambang endapan pasir mineral berat dari pantai. Proses pembentukan cebakan pasir mineral berat di pantai adalah batuan metamorf derajat tinggi dan batuan beku yang mengandung mineral berat ( $BJ > 2,7$ ) mengalami pelapukan kemudian tererosi dan menghasilkan kumpulan butiran ukuran pasir, lanau, lempung dan mineral berat ke sistem *fluvial*. Aliran dan sungai membawa detrital tersebut ke arah pantai dimana mereka akan diendapkan di beberapa lingkungan sungai, delta dan pantai. Cebakan tipe plaser yang ekonomis adalah cebakan berumur Kuartar, Paleogen dan Neogen.

### **Torium pada Cebakan Bauksit**

Di dalam endapan bauksit unsur radioaktif torium terbentuk dari hasil pelapukan batuan kaya alkali feldspar yang telah mengalami proses metasomatisme. Di dalam endapan laterit bauksit unsur torium terbawa oleh mineral-mineral sekunder hasil laterisasi seperti hematit dan buhmit. Unsur torium yang ada dalam bauksit dapat juga berasal dari

logam tanah jarang ringan, basnasit, zirkon atau anatas tetapi dalam ukuran sangat kecil dan hanya dapat didekdeksi dengan mikroskop elektron dan synchrotron spektroskopi [4]. Cebakan lateritik pada batuan karbonatit terbentuk pada batuan yang telah mengalami proses supergen. Mineral yang terbentuk pada endapan laterit adalah plubogomit, rhabdophan dan monasit sekunder. Mineral –mineral tersebut terbentuk pada zona bagian atas laterit atau pada zona pelapukan. Mineral lain yang terbentuk adalah gutit dan hematit serta dalam jumlah sedikit terbentuk mineral kalsit, kriptomelan, dolomit, holandit, kaolin, maghemit, piroklor, ilmenit, rutil, kuarsa, barit, anatas dan vermikulit.

#### **Torium pada Batuan Karbonatit**

Batuan karbonatit adalah batuan beku yang mengandung lebih dari 50% mineral karbonat primer seperti kalsit, dolomit dan ankerit, terbentuk oleh proses magmatik atau metasomatik. Pada batuan karbonatit unsur torium dijumpai bersama dengan logam tanah jarang (LTJ). Mineral bijih primer yang terbentuk pada saat kristalisasi magma adalah basnasit (REEs)CO<sub>3</sub>F dan parisit (G(REEs)<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> F<sub>2</sub>), sedangkan mineral yang terbentuk oleh proses sekunder seperti proses hidrotermal dan metasomatisme adalah monasit sekunder. Secara genetik karbonatit terbentuk berasosiasi atau dekat dengan batuan beku alkali [5]. Salah satu tambang LTJ dan torium yang besar di dunia antara lain terdapat di Mountain Pass di Kalifornia, USA. Bijih LTJ pada tambang Mountain Pass terdapat pada terobosan batuan karbonatit masif yang disebut *The Sulfide Queen Carbonatite*. Cadangan di tambang Mountain Pass sebanyak 16,7 juta ton dengan kadar rata-rata LTJ oksida adalah 7,98 % dan kadar torium 0,025%.

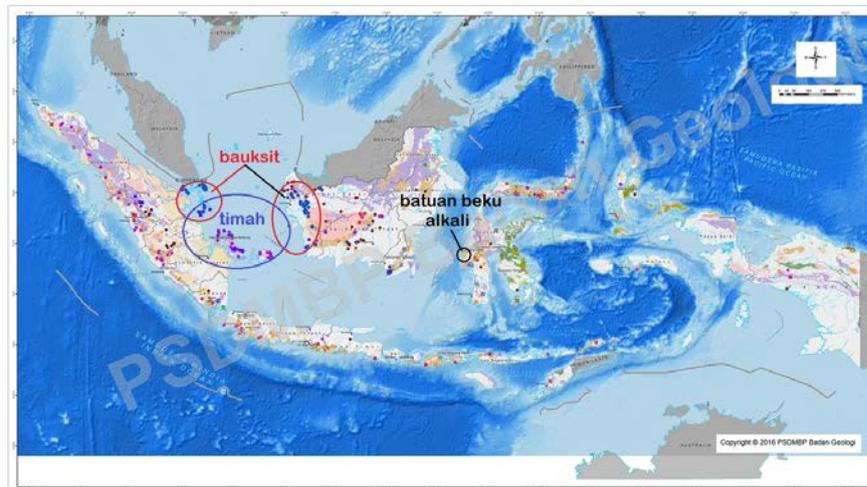
#### **Torium pada Batuan Beku Alkali**

Batuan beku alkali adalah batuan beku yang mengandung silika (SiO<sub>2</sub>) lebih sedikit dibanding logam alkali (Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O). Batuan beku alkali terbentuk dari kristalisasi magma silikat dan larutan yang kaya unsur alkali, membentuk mineral-mineral yang mengandung natrium dan kalium, seperti piroksin atau amfibol yang kaya sodium atau potassium. Torium dan LTJ memiliki hubungan genetik yang sangat kuat dengan proses-proses pembentukan batuan beku alkali. Batu beku alkali biasanya memiliki pengayaan LTJ yang lebih tinggi dibanding batuan beku lainnya. Sumber LTJ dan torium yang sangat potensial terdapat pada terobosan batuan beku alkali dan peralkalin. Beberapa contoh cebakan yang terkenal adalah cebakan Nechalacho di danau Thor, Kanada. Cebakan LTJ terdapat pada mineral fergusonit, alanit, basnasit, zirkon dan monasit [6]. Contoh lain adalah terdapat pada kompleks batuan beku alkali *Llímaussaq* di *Greenland* Selatan. Di daerah ini sedang dilakukan evaluasi sumber daya LTJ, Zn dan uranium. Batuan induk untuk deposit LTJ, Zn, U dan Th adalah syenit nefelin yang merepresentasikan sebagai batuan beku peralkalin. Torium dapat juga terbentuk pada cebakan mineral tipe urat yang terbentuk di zona rekahan, sesar, breksi pada batuan metasedimen dan metavulkanik dan sering berhubungan dengan kompleks batuan alkali dan karbonatit. Mineral utama cebakan pada ini adalah thorit, thorongummit, dan monasit yang berhubungan dengan beberapa mineral logam tanah jarang (LTJ) seperti alanit, basnasit dan xenotim. Contoh dari cebakan mineral tipe urat yang mengandung torium antara lain adalah cebakan yang terdapat daerah Lemhi Pass di Amerika Serikat dan Nolans Bore di Australia. Cebakan di Distrik Lemhi Pass adalah urat-urat mengandung mineral thorit sebagai batuan induk untuk torium [7]. Pada cebakan ini terdapat 219 urat kaya torium dan LTJ. Salah satu contoh urat adalah urat kuarsa-hematit-thorit mengisi zona rekahan dan breksiasi pada zona kuarsit dan siltit Mesoproterozoik. Torium juga terbentuk di urat monasit-thorit-apatit dan urat spekularit, biotit dan alkali feldspar. Setempat-setempat terdapat beberapa urat mengandung mineral karbonat, seperti kalsit, siderite dan ankerit dan flourit. Pada cebakan LTJ tipe urat mengandung torium dijumpai alanit dan monasit yang melimpah. Mineral lainnya adalah brokit dan xenotim. Mineral pengotornya adalah kuarsa, hematit, limonit, fluorapatit, potashium feldspar, bioitit, albit dan barit. Kadar LTJ oksida 0,428%, torium 0,43%. Cebakan Nolans Bore di Australia terdiri dari beberapa tipe urat dan zona breksiasi yang terisi fluorapatit yang berasosiasi dengan mineralisasi LTJ dan torium [8]. Cebakan tipe urat ini adalah cebakan yang terbentuk oleh proses hidrotermal yang terbentuk dalam beberapa fase pada zona sesar yang dekat atau berhubungan dengan kompleks batuan beku alkali dan timah serta pegmatit yang kaya tantalum. Mineral primernya adalah cheralit, thorit, alanit, basnasit, monasit dan LTJ mengandung fluorcarbonat.

## HASIL PENELITIAN

### Ketersediaan Torium Di Indonesia

Di Indonesia torium dapat ditemukan pada beberapa cebakan mineral dan batuan tertentu. Cebakan mineral yang mengandung thorium adalah cebakan timah dan bauksit sedangkan batuan tertentu yang mengandung thorium signifikan adalah batuan beku alkali dan batuan metamorfosa (Gambar 1).



Gambar 1. Peta ketersediaan torium pada beberapa cebakan mineral dan batuan di Indonesia (dimodifikasi dari peta sebaran mineral strategis di kabupaten/kota Indonesia [9] )

### Torium pada Cebakan Timah Primer

Cebakan timah primer di Indonesia terdapat di sepanjang zona granit jalur timah dari kepulauan Riau hingga Bangka Belitung. Cebakan tipe ini dijumpai pada daerah kontak antara batuan granit berumur Yura yang menerobos batuan malihan berumur Trias dan Permo Karbon. Cebakan timah primer umumnya berbentuk urat-urat kasiterit dengan tebal sentimetrik hingga metrik. Mineral utamanya adalah kasiterit sedangkan torium terdapat pada mineral monasit sebagai mineral ikutan. Gambar 2a dan 2b merupakan contoh cebakan timah primer yang terdapat di daerah Toboali, kabupaten Bangka Selatan. Pada gambar tersebut terlihat urat-urat kasiterit terdapat pada batuan granit Toboali berumur Yura yang menerobos batuan meta batupasir dari Formasi Tanjunggenting yang berumur Trias. Hasil analisis petrografi, mineragrafi dan autoradiografi dari tiga sampel sayatan tipis dan sayatan poles batuan granit memperlihatkan bahwa ketersediaan monasit pada granit adalah berkisar antara 0,01 hingga 0,02 %. Hasil analisis mineral butir dari sampel konsentrat dulang pada cebakan timah (kasiterit) primer sebanyak 12 buah menunjukkan ketersediaan monasit rata-rata adalah 5,07 % berat dari sampel seberat 5 gram (Tabel 2) [10].

Tabel 2. Hasil Analisis Mineral Butir i Konsentrat Dulang Cebakan Timah Primer dari Daerah Toboali Bangka Selatan [10]

No. Sampel	% Berat														
	Kasiterit	Monasit	Zirkon	Magnetit	Ilmenit	Hematit	Rutil	Hornblenda	Anatas	Fluorit	Biotit	Turmalin	Kalkopirit	Garnet	Kuarsa
MB.1	-	2.66	24.62	0.54	34.18	17.54	0.48	9.43	0.58	-	0.52	-	-	-	9.46
MB.2	1.39	2.97	23.65	0.06	22.39	42.21	0.39	4.97	0.69	-	-	-	-	-	1.30
MB.3	2.05	5.14	38.23	0.41	20.70	18.03	1.25	5.15	0.86	-	-	0.46	0.38	-	7.34
MB.4	2.01	1.98	34.12	0.21	47.30	4.40	0.90	4.37	0.59	0.19	-	-	-	-	3.93
MB.5	13.62	13.76	15.09	0.30	22.20	28.27	1.02	3.19	0.51	-	-	-	-	0.41	1.62
MB.6	7.66	6.18	58.2	0.54	10.9	3.13	3.55	5.31	0	0.33	0	0	0	0	4.2
MB.7	4.11	6.06	44.84	0.45	17.7	19.95	0.59	2.06	0.55	0.31	0	0	0	0.52	2.86
MB.8	4.58	6.47	50.9	0.42	14.18	13.87	0.92	5.31	1.14	0	0.32	0	0	0.35	1.54
MB.9	14.53	4.02	50.92	0.21	15.47	2.19	2.75	5.29	0.61	0	0.37	0.59	0	0	3.05
MB.10	34.38	9.29	3.05	0.52	0.74	1.16	0	49	0.51	0	0	0	0	0	1.35
MB.11	11.87	1.95	1.07	0.44	2.94	6.97	0.36	61.06	0	0	0	0	0	0	13.34
MB.12	95.02	0.33	0.24	0.3	0.26	1.92	0	0.05	0	0	0	0	0	0	1.88
Rata-rata	17.38	5.07	28.74	0.37	17.41	13.30	1.22	12.93	0.67	0.28	0.40	0.53	0.38	0.43	4.32

Torium yang terdapat pada cebakan timah primer di Bangka selatan diperkirakan juga dapat ditemukan pada cebakan timah primer di daerah Pemali Kabupaten Bangka Induk [11], cebakan timah primer di daerah Tempilang Kabupaten Bangka Barat [12] dan cebakan timah primer di daerah Tanjung Gunung dan Batu Belubang Kabupaten Bangka

Tengah [13] karena cebakan timah primer di daerah Pemali, Tempilang, Tanjung Gunung dan Batu Belubang secara tektonik regional merupakan satu rangkaian dari granit jalur timah Asia Tenggara yang kaya timah dan monasit.



Gambar 2a. Cebakan timah primer di Bangka Selatan [10]



Gambar 2b. Urat-urat kasiterit pada batuan granit [10]

### Torium pada Cebakan Timah Sekunder

Cebakan timah sekunder di Indonesia terdapat di sepanjang zona granit jalur timah dari kepulauan Riau hingga Bangka Belitung. Cebakan tipe ini dijumpai pada endapan alluvial sungai dan atau pantai. Cebakan timah sekunder umumnya berbentuk konsentrat-konsentrat mineral berat berukuran pasir yang terkonsentrasi pada endapan sungai dan pantai. Mineral utama cebakan timah sekunder adalah kasiterit sedangkan torium terdapat pada mineral monasit sebagai mineral ikutannya.

Gambar 3a dan 3b merupakan contoh cebakan timah sekunder yang terdapat di daerah Bencah, kabupaten Bangka Selatan. Pada gambar tersebut terlihat endapan aluvial hasil pengendapan *meander* sungai yang dicirikan oleh struktur sedimen *cross bedding*. Hasil analisis mineral butir dari sampel konsentrat dulang sebanyak 7 buah menunjukkan keterdapatan monasit rata-rata adalah 9,60 % berat dari sampel seberat 5 gram (Tabel 3) [10]. Keterdapatan monasit pada cebakan timah sekunder seperti yang dijumpai di daerah Bencah, Bangka Selatan ternyata juga ditemukan di daerah Cerucuk Belitung [14] dan daerah Tumbang Rusa Belitung [15].



Gambar 3a. Cebakan timah sekunder di daerah Bencah Bangka Selatan [10]



Gambar 3.b. Struktur sedimen *cross bedding* pada cebakan timah sekunder di daerah Bencah, Bangka Selatan [10]

Tabel 3. Hasil analisis mineral butir konsentrat dulang cebakan timah sekunder dari daerah Bencah Bangka Selatan [10].

No	Kode sampel	Kasiterit (%)	Monasit (%)	Zirkon (%)	Magnetit (%)	Ilmenit (%)	Hematit (%)	Rutil (%)	Anatas (%)	Turmalin (%)	Fluorit (%)	Garnet (%)	Pirhotit (%)
1	MB4	5.83	4.96	23.38	1.67	58.49	3.09	1.1	0.75	0	0.38	0.35	0
2	MB5A	6.24	7.76	10.41	0.26	73.74	0.78	0.21	0.08	0	0	0.28	0.24
3	MB10	12.27	11.94	48.34	0.34	18.18	5.54	0.3	0.85	1.5	0.37	0.37	0
4	MB14	13.86	10.86	4.76	0.68	39.61	25.94	1.07	0.52	1.84	0.33	0.53	0
5	MB18	3.63	8.04	16.9	0.34	69.26	0.28	0.34	0.25	0	0	0.28	0.68
6	MB22	5.89	6.37	48.04	0	30.01	4.98	0.78	0.66	2.42	0.57	0.28	0
7	MB23	1.34	3.35	12.88	0.12	73.16	7.41	0.08	0.7	0.82	0.14	0	0
8	MB31B	4.39	7.29	8.76	16.41	12.68	4.72	0.67	1.23	42.86	0.99	0	0
Jumlah		53.45	60.57	173.47	19.82	375.13	52.74	4.55	5.04	49.44	2.78	2.09	0.92
Rata-rata		6.68	7.57	21.68	2.83	46.89	6.59	0.57	0.63	7.06	0.35	0.35	0.31

### Torium pada Cebakan Bauksit

Cebakan laterit bauksit di Indonesia terdapat di sekitar wilayah batuan granit berumur Trias – Kapur yang telah mengalami pelapukan lanjut yang tersebar di kepulauan Riau dan Kalimantan Barat (Gambar 1). Torium umumnya terdapat di dalam mineral monasit, xenotim, zirkon dan anatas. Pada cebakan laterit bauksit mineral monasit, xenotim, zirkon dan anatas terdapat pada zona bagian atas laterit atau pada zona pelapukan. Keterdapatannya torium pada cebakan laterit bauksit ditemukan di pulau Singkep dan Ketapang, Kalimantan Barat.

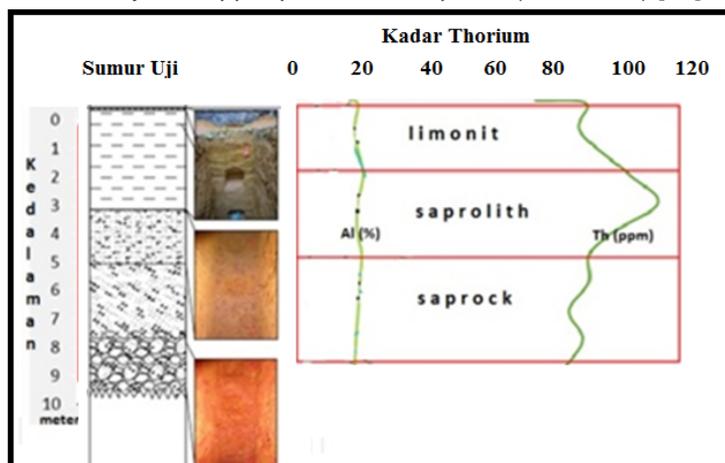
Di pulau singkep laterit bauksit merupakan pelapukan dari granit Muncung yang berumur Trias (Gambar 4). Granit berwarna abu abu kemerahan, holokristalin alotriomorfik granular ukuran mineral 0,06 – 2 mm. Komposisi mineral terdiri dari alkali felspar 45 %, kuarsa 25 %, plagioklas 22 %, biotit 5 %, monasit 1 %, epidot 0,5 %, mineral opak 0,5 %, zirkon 0,5%, apatit 0,5 %. Plagioklas berupa oligoklas, sebagian telah berubah menjadi serisit dan mineral lempung. Alkali felspar berupa ortoklas dan mikroklin, sebagian telah berubah menjadi serisit dan mineral lempung. Kuarsa sebagian tumbuh bersama ortoklas membentuk tekstur grafik. Biotit sebagian telah berubah menjadi muskovit, serisit, dan oksida besi. Kadar torium dari 14 sampel konsentrat dulang yang diambil dari endapan laterit bauksit di pulau Singkep berkisar antara 557 – 13.200 ppm Th dengan kadar rata-rata adalah 4.210 ppm [16].



Gambar 4. Endapan laterit bauksit di pulau Singkep [16]

Di daerah Ketapang Kalimantan Barat, unsur torium ditemukan dalam endapan laterit bauksit hasil pelapukan batuan basalt berumur Kapur Akhir – Paleosen. Hasil pengukuran kadar torium yang dilakukan pada sumur uji endapan laterit bauksit di daerah Ketapang, Kalimantan Barat menunjukkan bahwa pengayaan Torium terjadi pada endapan saprolith dibandingkan pada limonit dan saprock. Batuan basalt dalam kondisi sangat lapuk. Warna abu-abu kecoklatan hingga coklat kemerahan, tekstur afanitik, komposisi mineral terdiri atas plagioklas, hornblende dan olivin. Kadar torium pada sumur uji pada kedalaman 0 meter hingga 10 meter adalah berkisar dari 75 ppm hingga 115 ppm dengan kadar rata-rata 91,1 ppm sedangkan kadar aluminium berkisar dari 18 % sampai dengan 20 %. Tidak ada korelasi antara unsur torium dan unsur aluminium. Pengayaan unsur torium terjadi pada zona saprolith yaitu di permukaan mempunyai kadar 75 ppm kemudian pada zona limonit

meningkat menjadi 90 ppm dan puncaknya pada zona saprolith meningkat menjadi 115 ppm selanjutnya menurun menjadi 80 ppm pada zona saprock (Gambar 5) [17].



Gambar 5. Penampang sumur uji pada endapan laterit bauksit di Ketapang, Kalimantan Barat [17]

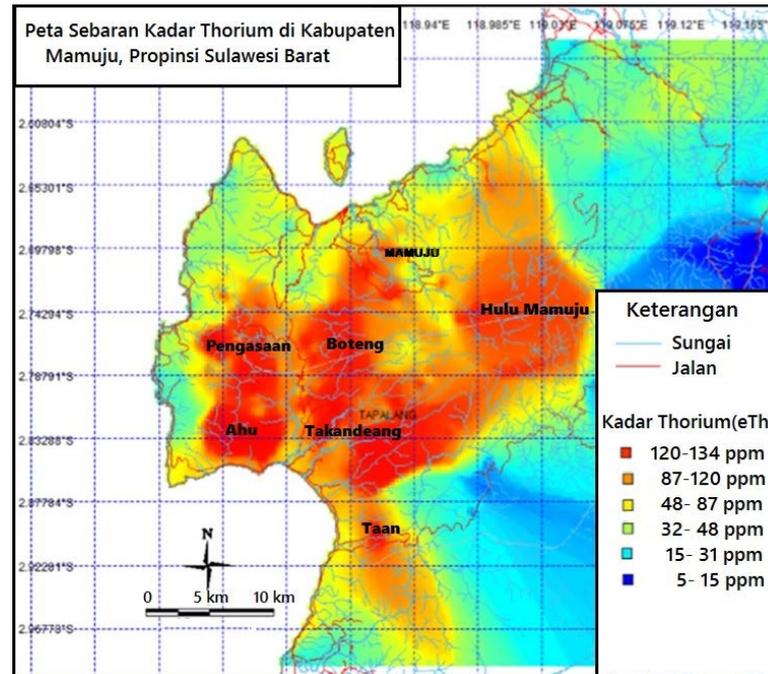
### Torium pada Batuan Beku Alkali

Torium pada batuan beku alkali ditemukan di daerah Mamuju, Sulawesi Barat. Cebakannya berbentuk urat-urat dengan tebal milimetrik sampai dengan desimetrik (Gambar 6) Mineral radioaktif pada cebakan urat tersebut adalah thorianit ( $\text{ThO}_2$ ). [18], atau thorit  $\text{ThSiO}_2$  [19]. Mineralisasi dikontrol oleh system frakturasi berarah umum tenggara – barat laut yang diperkirakan terbentuk bersamaan dengan proses mineralisasi uranium dan torium [20]. Kadar torium urat-urat bijih thorit yang diambil di hulu sungai Mamuju berdasarkan hasil analisis menggunakan alat XRF adalah berkisar antara 751 ppm sampai dengan 11,10 %.



Gambar 6. Singkapan Urat-urat Thorit di Hulu Sungai Mamuju, Sulawesi Barat ) [18,19]

Selain berbentuk urat, keterdapatan torium di batuan beku alkali juga terdapat pada batuan gunungapi Adang yang berumur Miosen Akhir [21]. Hasil analisis petrografi beberapa sampel batuan gunungapi Adang menunjukkan bahwa batuan penyusun kompleks gunungapi di daerah Mamuju sangat bervariasi secara umum terdiri dari batuan beku alkali yang didominasi oleh tephrite, tephriponolite, phonotephrite, dan phonolite. Kadar torium batuan beku alkali ini berdasarkan hasil pengukuran secara kontinu menggunakan spektrometer sinar gamma RS 125 adalah berkisar antara 5 – 134 ppm eTh (Gambar 7), sedangkan hasil analisis kadar torium menggunakan alat XRF terhadap 10 sampel batuan menunjukkan kadar torium berkisar antara 86,9 ppm sampai dengan 1100 ppm [22].



Gambar 7. Peta Sebaran Kadar Torium daerah Mamuju, Sulawesi Barat [22]

## PEMBAHASAN

Pada cebakan timah, baik cebakan timah primer maupun sekunder, unsur torium terdapat dalam mineral monasit yang merupakan mineral ikutan dari tambang timah. Secara geologis cebakan timah primer dan sekunder di Indonesia dikontrol oleh zona granit jalur timah yang membentang dari kepulauan Riau hingga Bangka Belitung. Keterdapatan monasit pada konsentrat dulang seberat 5 gram yang diambil dari cebakan timah primer adalah sekitar 5,07% berat, sedangkan pada cebakan timah sekunder adalah 7,57 % berat [10]. Dengan pelamparan yang sangat luas yang membentang dari kepulauan Riau hingga Bangka Belitung maka potensi torium atau monasit yang terdapat pada cebakan timah primer dan sekunder dianggap sangat potensial walaupun cadangan monasit hingga saat ini belum diketahui dengan pasti. Cadangan timah tahun 2016 adalah sebesar 335.909 ton [23]. Data tahun 2016 dari Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara dan Panasbumi Kementerian Energi dan Sumberdaya Mineral menunjukkan bahwa sumber daya monasit di Indonesia tahun 2016 adalah 7.014.687.516 ton bijih atau setara dengan 191.914 ton metal [24]. Status teknologi proses pengolahan monasit saat ini adalah BATAN telah mampu mengolah monasit menjadi  $REOH_3$  yang terpisah dengan uranium dan thorium dalam skala pilot [25].

Pada tambang bauksit, torium juga terdapat dalam mineral monasit sebagai mineral ikutan tambang bauksit. Keterdapatan monasit dari konsentrat dulang seberat 5 gram yang diambil pada tambang bauksit adalah sekitar 1,8 % berat dengan kadar thorium 4.210 ppm. Potensi monasit di dalam tambang bauksit diperkirakan cukup potensial karena pelamparan tambang bauksit sangat luas yaitu terdapat di sekitar Riau kepulauan dan Kalimantan Barat. Jumlah sumber daya bauksit di Indonesia adalah 3.787.345.741 ton bijih atau setara dengan 1.819.410.243 ton metal [24] Keterdapatan monasit di tambang timah dan bauksit belum dikelola secara maksimal. Saat ini monasit masih dianggap sebagai tailing tambang. Untuk persiapan penggunaan torium sebagai bahan bakar masa depan diperlukan koordinasi para pemangku kepentingan.

Pada batuan beku alkali thorium terdapat di dalam dua tipe yaitu pada urat-urat mineral thorit dan tersebar merata dalam batuan. Kadar torium pada urat-urat thorit adalah berkisar antara 751 ppm sampai dengan 11,10% sedangkan kadar torium pada batuan beku alkali adalah berkisar dari 86,9 hingga 1100 ppm. Diperkirakan cebakan mineral utama pada batuan beku alkali adalah cebakan logam tanah jarang. Batuan beku alkali terdapat di Kabupaten Mamuju, Propinsi Sulawesi Barat dengan luas pelamparan batuan adalah sekitar 80.000 ha. Dengan pelamparan batuan yang cukup luas dan kadar torium ada yang mencapai 11,10 % maka keterdapatan torium pada batuan beku alkali di Kabupaten Mamuju

diperkirakan mempunyai prospek yang cukup menjanjikan. Jumlah cadangan torium belum diketahui secara pasti hingga saat ini oleh karena itu perlu tindak lanjut pengembangan kearah perhitungan cadangan dalam dekade lima tahun ke depan. Status teknologi proses saat ini yang telah dilakukan adalah pemisahan torium dan logam tanah jarang dari bijih urat-urat thorit pada skala laboratorium [19].

### KESIMPULAN

Berdasarkan data keterdapatan torium atau monasit serta luas penyebarannya yang terdapat pada tambang timah, tambang bauksit dan batuan beku alkali di Indonesia maka dapat disimpulkan bahwa torium di Indonesia mempunyai prospek yang bagus sebagai bahan bakar nuklir masa depan.

### UCAPAN TERIMAKASIH

Pada kesempatan yang sangat baik ini penulis mengucapkan banyak terimakasih kepada Bapak Ir, Yarianto Sugeng Budi Susilo, MSi selaku kepala Pusat Teknologi Bahan Galian Nuklir yang telah memberi kesempatan kepada penulis untuk melakukan penelitian ini.

### DAFTAR PUSTAKA

1. NEA-IAEA,. Nuclear Energy Agency (NEA) Organization for Economic Co-operation and Development (OECD) and International Atomic Energy Agency (IAEA), "Introduction of Torium in the nuclear Fuel Cycle Short to Longterm Consideration" NEA No.7224,136p, Vienna ( 2015)
2. NEA-IAEA, Nuclear Energy Agency (NEA) Organization for Economic Co-operation and Development (OECD) and International Atomic Energy Agency (IAEA), "Uranium Resources, Production and Demand" OECD Report No.7209,504p. Vienna ( 2014)
3. BRADLEY S. VAN GOSEN AND HARIKRISHNAN TULSIDAS, "*Uranium for Nuclear Power*" Resources, Mining and Transformation to Fuel, Chapter 10. Torium for Nuclear Power" Pages 253–296, Elsevier, (2016).
4. GAMALETSOS PLATON, GODELITSAS ATHANASIO, KASAMA TAKESHI, KUZMIN ALEXEI, STEININGER RALPH, PONTIKES YIANNIS, GOTTLICHER JORG, " The Nature of Torium in Bauxite and Bauxite Residue from Greece" DTU's Sustain Conference (2015)
5. VERPLANCK,P.L., VAN GOSEN, B.S., SEAL,R.R., Mc.CAFFERTY,A.E., "*A Deposit Model for Carbonatite and Peralkaline Intrusion related Rare Earth Element Deposits*", U.S. Geological Survey Scientific Investigation Report 2010-5070-J,58p, (2014).
6. SHEARD, E.R., WILLIAMS JONES,A.E., HEILIGMANN,N., PEDERSON,C., TRUEMAN,D.L., "Controls on the Concentration of Zirconium, Niobium and Rare Earth Elements in the Thor Lake rare Metal Deposit, Northwest territories,Canada"Geol.107,81-104, (2012).
7. VAN GOSEN, B.S., GILLERMAN,V.S.,ARMBRUSTMACHER,T.J.,"Torium Deposits of the United States – Energy Resources for the Future?", US Geol. Surv. Circ.1336,21, (2009).
8. HOATSON D.M., JAIRETS S., MIEZITIS Y., " The Major Rare Earth Elements Deposits of Australia : Geological Setting, Exploration and Resources" Geoscience Australia, 204 p., (2011)..
9. Pusat Sumberdaya Mineral, Batubara dan Panas Bumi - Badan Geologi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral", Peta Sebaran Mineral Strategis di Kabupaten/Kota di Indonesia, Bandung, (2016).
10. NGADENIN, "Sebaran Monasit pada Granit dan Aluvial di Bangka Selatan"Jurnal Pusat Pengembangan Energi Nuklir Vol.13, No.2, Desember, (2011).
11. MANINJI, LAMECK "Geologi, Model Endapan, Mineralisasi Timah Primer, Pemali Tambang Timah ; Geology, Deposit Model, Primary Tin Mineralization, Pemali Tin Mine" Thesis S2 Teknik Geologi UGM,Yogyakarta, (2015).

12. MIFTAH MUKIFIN ALI "Geologi, Alterasi, Dan Mineralisasi Timah Primer Blok Lembah Jambu, Kecamatan Tempilang, Kabupaten Bangka Barat, Provinsi Kepulauan Bangka Belitung" Thesis S2 Teknik Geologi UPN, Yogyakarta, (2017)
13. FRISKA PUTRI AYUNDA "Studi Geologi, Alterasi, Dan Mineralisasi Timah Primer Di Desa Tanjung Gunung Dan Batu Belubang, Kecamatan Pangkalan Baru, Kabupaten Bangka Tengah, Provinsi Bangka-Belitung", Skripsi S1 Teknik Geologi UGM, Yogyakarta, (2017)
14. BAMBANG SOETOPO, LILIK SUBIANTORO, PRIYO SULARTO, DWI HARYANTO "Studi Deposit Monasit dan Zirkon Dalam Batuan Kuarter Di Daerah Cerucuk Belitung" *Eksplorium* Volume 33 No. 1, Mei 2012: 25 – 40
15. BAMBANG S., LILIK S., NGADENIN, NUNIK M., " Studi Prospek Monasit Di Daerah Tumbang Rusa, Tanjung Pandan, Belitung, Propinsi Bangka Belitung" *Eksplorium* Volume XXXII No. 155, Mei 2011 : 29 – 46
16. NGADENIN, KURNIA S.W, ADHIKA J.K, "Studi Keterdapatan Torium Pada Endapan Laterit Bauksit di Pulau Singkep dalam rangka Pengembangan Eksplorasi Torium di Wilayah Granit Jalur Timah ", *Eksplorium* Volume 39 No. 1, Mei 2018: 17–26
17. WIDODO, PUTRI RAHMAWATI, NGADENIN," Identifikasi Keterdapatan Torium Pada Endapan Laterit Bauksit Di Daerah Nanga Tayap – Sandai, Kabupaten Ketapang, Kalimantan Barat ", Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir 2017, Makassar, 12 Oktober 2017, hal. 527-536
18. I GDE SUKADANA, HERI SYAEFUL, FD. DIAN INDRAMOMO, KURNIA SW, ERSINA RAKHMA "Identification of Mineralization Type and Specific Radioactive Minerals in Mamuju, West Sulawesi" *J. East China Univ. Technol.*, vol. 39, pp. 39–48, 2016.
19. MOCH IQBAL NUR SAID, MUTIA ANGGRAINI, MOHAMMAD ZAKI MUBAROK, KURNIA SETIAWAN WIDANA "Studi Ekstraksi Bijih Thorit dengan Metode Digesti Asam dan Pemisahan Torium dari Logam Tanah Jarang dengan Metode Oksidasi-Presipitasi Selektif", *Buletin Eksplorium* Vol 38, No. 2, November 2017, hal 109-120
20. FREDERIKUS DIAN INDRAMOMO, I GDE SUKADANA, SUHARJI., "Identifikasi Pola Struktur Geologi Sebagai Pengontrol Sebaran Mineral Radioaktif Berdasarkan Kelurusan pada Citra Landsat-8 di Mamuju, Sulawesi Barat" *Eksplorium* Volume 38 No. 2, November 2017: 71–80
21. N. RATMAN dan S. ATMAWINATA., "Peta Geologi Lembar Mamuju, Sulawesi Sekala 1 : 250.000" Puslitbang Geologi, Bandung,(1993)
22. I GDE SUKADANA, AGUNG HARIJOKO LUCAS DONNY SETIJADJ "Tataan Tektonika Batuan Gunung Api Di Komplek Adang, Kabupaten Mamuju, Provinsi Sulawesi Barat" *Eksplorium* Volume 36 No. 1, Mei 2015: 31–44
23. PT. Timah Tbk. <http://www.timah.com/v3/eng/operational-review-performance-report/> diakses 6 Agustus 2018
24. Pusat Sumberdaya Mineral Batubara dan Panas Bumi Kementerian ESDM "Executive Summary Pemutakhiran Data Dan Neraca Sumber Daya Mineral Status 2016" Bandung,( 2017)
25. HAFNI L.N., FAIZAL R., SUGENG W., BUDI S., ARIF S., SUSILANINGTYAS, "Pengolahan Monasit dari Limbah Penambangan Timah : Pemisahan Logam Tanah Jarang (RE) dari U dan Th", Prosiding Presentasi Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir V, Jakarta, (2000)

Halaman ini sengaja di kosongkan

## IDENTIFIKASI PRODUK FISI PENTING PADA FASILITAS UJI SAMOP

**Azizul Khakim**

*Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN), Jl. Gajah Mada No.8 Jakarta 10120 Indonesia  
email: a.khakim@bapeten.go.id*

### ABSTRAK

**IDENTIFIKASI PRODUK FISI PENTING PADA FASILITAS UJI SAMOP.** Di samping Mo-99 yang merupakan produk utama dari SAMOP, beberapa produk fisi yang berpotensi membahayakan lingkungan, jika terlepas dari bahan bakar, juga harus diperhitungkan. Produk fisi yang perlu mendapat perhatian jika terlepas akibat kesalahan penanganan bahan bakar maupun kecelakaan saat transportasi antara lain Cs-137, Kr-85, I-135, I-131 dan Sr-90. Mengingat bahan bakar SAMOP berbentuk cair, sehingga lebih mudah terlepas ke lingkungan jika tabungnya gagal, maka konsentrasi produk fisi tersebut perlu dihitung. Makalah ini bertujuan untuk menghitung kandungan produk fisi penting pada fasilitas uji SAMOP setelah 5 hari operasi. Perhitungan telah dilakukan dengan *code* deplesi berbasis metode Monte Carlo MCNPX. Total produk fisi Cs-137, Kr-85, I-135, I-131 dan Sr-90 masing-masing adalah  $9,816 \times 10^{-3}$ ;  $1,16 \times 10^{-3}$ ;  $3,16 \times 10^1$ ; 4,68 dan  $9,77 \times 10^{-3}$  Ci. Kandungan paling besar terdapat pada tabung anular, sedangkan konsentrasi aktivitas volumetrik tertinggi ada pada tabung tengah.

Kata kunci: Produk fisi, SAMOP, deplesi, MCNPX, perangkat subkritis.

### ABSTRACT

**IDENTIFICATION OF IMPORTANT FISSION PRODUCTS AT SAMOP TEST FACILITY.** Other than Mo-99 which is the main product of SAMOP, some fission products that are potentially harmful to the environment, if released from the fuel, also have to be calculated. The fission products that need serious attention, if released due to mishandling the fuels or accident during transport, among others Cs-137, Kr-85, I-135, I-131 and Sr-90. As the SAMOP fuels are liquid, the fission product can be easily released if the tubes failed, thus their concentration need to be calculated. This paper is aimed at calculating the important fission product contents in SAMOP test facility after 5 days operation. The calculations have been done using depletion code based on monte carlo method MCNPX. The total fission product of Cs-137, Kr-85, I-135, I-131 and Sr-90 are  $9,816 \times 10^{-3}$ ;  $1,16 \times 10^{-3}$ ;  $3,16 \times 10^1$ ; 4,68 and  $9,77 \times 10^{-3}$  Ci, respectively. The maximum content of those isotopes were deposited in annular tube, on the other hand the maximum volumetric activities were concentrated in the central tube.

Keyword: fission product, SAMOP, depletion, MCNPX, subcritical assembly.

### PENDAHULUAN

Di samping Mo-99 yang merupakan produk yang diinginkan oleh fasilitas uji SAMOP (*Subcritical Assembly for Mo-99 Production*) [1], beberapa produk fisi yang berpotensi membahayakan lingkungan dan kesehatan, jika terlepas dari bahan bakar, juga harus diperhatikan dan diperhitungkan. Beberapa produk fisi yang perlu mendapat perhatian jika terlepas akibat kesalahan penanganan bahan bakar maupun kecelakaan saat transportasi antara lain sesium-137 (Cs-137), krypton-85 (Kr-85), iodium-135 (I-135), iodium-131 (I-131) dan strontium-90 (Sr-90).

Isotop I-131 adalah produk fisi yang penting karena bersifat volatil dan jika terlepas ke udara dapat terhirup atau terdeposisi pada tanaman. Kekhawatirannya adalah jika terhirup atau tertelan dapat mengendap pada kelenjar tiroid dan memberikan dosis radiasi yang signifikan pada tiroid. Tiroid dapat menampung iodium baik stabil maupun radioaktif. Penyerapan iodium radioaktif dapat menyebabkan efek yang akut, kronis dan tertunda (seperti kanker). Kecelakaan Chernobyl pada 1986 telah membuktikan adanya kenaikan yang signifikan pada penderita kanker tiroid di negara bekas Uni Soviet selama 1992-2000 [2]. Salah satu tindakan untuk melindungi dari resiko iodium radioaktif adalah dengan mengkonsumsi potasium iodium (KI) sebelum menerima paparan iodium radioaktif. Iodum non-radioaktif akan menjenuhkan tiroid, sehingga hanya sedikit iodium radioaktif yang tertampung dalam tiroid. Cara ini mengurangi efek iodium radioaktif hingga 99 %.

Kr-85 memiliki waktu paruh 10,73 tahun, efek radiologisnya berkisar dari sedang hingga jangka panjang. Kr-85 akan melepas dua  $\beta^-$  dengan energi rerata 47,5 keV dan 251,4 keV, dan juga sinar gamma dengan energi 514 keV. Anak dari peluruhan Kr-85 adalah nuklida Rb-85 [3].

Sesium juga volatil pada temperatur yang lebih tinggi dari volatilitas iodium [4]. Sesium memiliki waktu paruh yang jauh lebih lama dari pada I-131, dan dapat mengendap di lingkungan selama beberapa tahun setelah terlepas. Sesium melepaskan radiasi gamma karakteristik ketika meluruh, dan relatif mudah untuk mengukur. Isotop Cs-137 menjadi masalah jangka panjang karena akan tetap berada di lapisan tanah bagian atas. Tanaman dengan akar yang dangkal akan cenderung menyerap Cs-137 selama bertahun-tahun. Sehingga rumput dan jamur dapat membawa sejumlah Cs-137 yang ditransfer ke tubuh manusia melalui rantai makanan. Pembuangan beberapa cm permukaan tanah bisa menjadi solusi, jika terjadi kontaminasi pada tanah. Pupuk yang mengandung potasium dapat digunakan untuk mencairkan sesium dan membatasi penyerapan oleh tanaman.

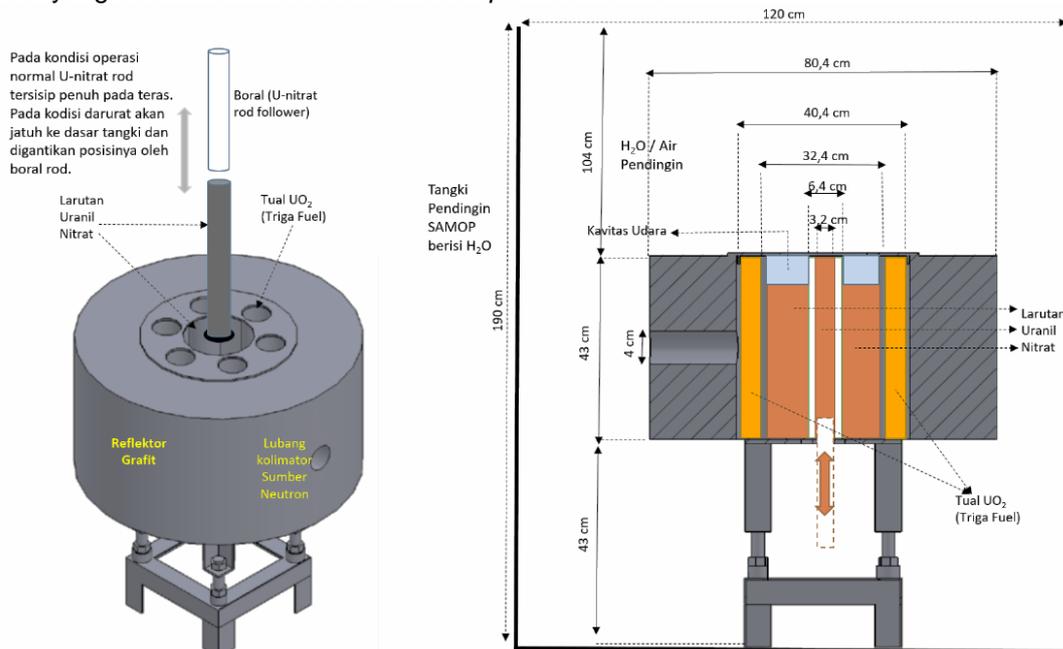
Sr-90 tidak begitu mudah terlepas dari bahan bakar sebagaimana iodium dan sesium, tetapi radionuklida tersebut menimbulkan efek biologi yang signifikan karena secara biokimia berperilaku seperti kalsium, terakumulasi pada tulang jika masuk ke tubuh. Hal ini terutama jika anak-anak yang meminum susu dalam jumlah banyak yang terkontaminasi oleh Sr-90 akan menerima paparan yang besar.

Mengingat bahan bakar SAMOP berbentuk cair, sehingga jika terjadi kegagalan tabung akan mudah terlepas ke lingkungan, maka konsentrasi dari masing-masing produk fisi di atas perlu dihitung. Perhitungan dilakukan dengan *code* depleksi berbasis Monte Carlo MCNPX.

Makalah ini bertujuan untuk menghitung potensi maksimum kandungan produk fisi penting, seperti Cs-137, Kr-85, I-135, I-131 dan Sr-90 pada masing-masing tabung fasilitas uji SAMOP setelah operasi selama 5 hari. Sehingga jika salah satu tabung mengalami kegagalan yang menyebabkan pelepasan produk fisi, maka jumlah pelepasan maksimum masing-masing produk fisi tersebut telah diketahui kuantitasnya. Kajian ini juga memberikan dukungan teknis dalam proses perijinan utilisasi baru, yaitu integrasi teras SAMOP dengan salah satu beamport reaktor Kartini.

### GEOMETRI SAMOP DAN MODEL MCNPX

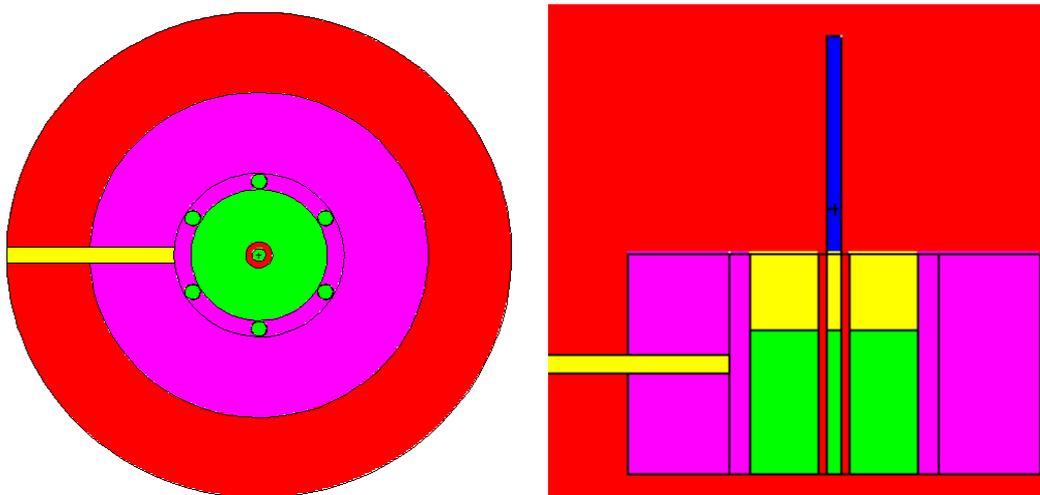
Fasilitas uji SAMOP merupakan sistem subkritis dari larutan uranil nitrat ( $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ ) yang dimasukkan dalam tabung yang dikelilingi dengan reflektor grafit. Karena sistem ini bersifat subkritis, maka SAMOP tidak dapat melangsungkan reaksi fisi secara berkesinambungan. Agar reaksi fisi tetap berlangsung, maka diperlukan sumber neutron dari luar yang dalam hal ini berasal dari *beamport* reaktor Kartini.



Gambar 1. Teras 3-D dan tangki sistem pendingin fasilitas uji SAMOP [5]

Gambar 1 menunjukkan teras 3D dan sistem fasilitas uji SAMOP yang terdiri dari tabung pusat yang dapat bergerak naik turun. Di luarnya terdapat tabung anular yang berisi larutan yang sama. Di sisi periferal terdapat 6 lubang yang dapat diisi oleh tabung dengan larutan yang sama atau bisa juga diisi dengan bahan bakar TRIGA. Pada tabung larutan uranil nitrat di pusat, bagian atasnya terhubung dengan batang kendali yang terbuat dari borat. Pada operasi normal, larutan uranil nitrat berada pada ketinggian yang sama dengan teras SAMOP. Sedang pada saat padam (*shutdown*), batang borat akan menyisip pada teras SAMOP, dan larutan uranil pusat yang berfungsi sebagai *fuel follower* berada di posisi bawah teras. Sistem larutan ini dikelilingi oleh grafit yang berfungsi sebagai reflektor neutron. Pada bagian reflektor grafit terdapat lubang kolimator yang menghubungkan teras SAMOP dengan *beamport* reaktor Kartini, dimana arus neutron akan bergerak dari teras Kartini menuju teras SAMOP.

Gambar 2 memperlihatkan tampak lintang mendatar dan tegak dari model geometri teras SAMOP dengan *code* MCNPX yang digunakan untuk perhitungan deplesi.



Gambar 2. Model geometri MCNPX untuk tampak lintang mendatar dan tegak teras SAMOP

Volume dari masing-masing tabung bahan bakar uranil nitrat SAMOP tertera pada Tabel 1.

Tabel 1. Volume masing-masing silinder larutan bahan bakar SAMOP [6]

Silinder	Volume (cm <sup>3</sup> )
Annular cylinder	22382,00
Central cylinder	226,00
Peripheral cyl 1, 2, 3, 4, 5, and 6	287,54
Total	24333,24

## METODOLOGI

Sebelum dilakukan perhitungan *burnup*, yang terlebih dulu dihitung adalah daya fisi pada SAMOP. Perhitungan ini menggunakan *code* MCNP5 [7] dengan menggabungkan antara geometri SAMOP dan geometri reaktor Kartini yang terhubung melalui salah satu *beam port* reaktor. Sebagian fluks neutron dari reaktor Kartini akan bergerak menuju sistem SAMOP melalui *beamport* tersebut, yang memungkinkan reaksi fisi dapat berlangsung secara berkesinambungan pada sistem SAMOP walaupun kondisinya subkritis. *Tally* F7 diterapkan pada delapan tabung SAMOP, yang selanjutnya dilakukan normalisasi untuk mendapatkan daya masing-masing tabung dan daya totalnya [8].

Daya fisi hasil perhitungan MCNP5 digunakan sebagai input untuk perhitungan deplesi. Dengan metode ini, perhitungan *burnup* cukup menggunakan geometri SAMOP saja, tanpa digabung dengan geometri reaktor Kartini. Hal ini akan mengurangi jumlah sel secara signifikan, yang pada akhirnya mempercepat proses perhitungan *burnup*.

Perhitungan *burnup* dilakukan dengan menggunakan MCNPX 2.70 yang merupakan *code* transport partikel dengan kemampuan menghitung laju reaksi kondisi ajeg, parameter normalisasi, parameter neutronik dan juga fraksi bakar bahan bakar menggunakan CINDER90 untuk menghitung parameter *decay constant* [9]. Data nuklir yang digunakan adalah

*Evaluated Nuclear Data File* (ENDF/B-VII). Tampang lintang  $S(a,b)$  diterapkan pada material yang memiliki efek hamburan termal seperti larutan uranil nitrat, moderator air dan reflektor grafit. Mode KCODE digunakan untuk perhitungan parameter neutronik. Kartu BURN ditambahkan untuk perhitungan inventori produk fisi, yang antara lain mencakup parameter TIME, POWER, PFRAC, MAT, dan lain-lain. Sesuai dengan rencana mode operasinya, dalam perhitungan ini diasumsikan SAMOP beroperasi selama 5 hari dengan *burnup step* selama 1 hari. Material yang mengandung bahan fisil dalam SAMOP ditandai sebagai material yang akan dihitung *burnup*-nya.

Secara umum komposisi suatu nuklida yang merupakan hasil reaksi neutron dengan material di reaktor dapat diformulasikan sebagai berikut:

$$\frac{dN_i^z(t)}{dt} = \sum_{j \neq i} f_{j \rightarrow i} \lambda_j N_j^z(t) + \sum_{k \neq i} fact(t) \{g_{k \rightarrow i} C_k^z + \gamma_{k \rightarrow i} F_k^z + h_{k \rightarrow i} W_k^z\} N_k^z(t) - [\lambda_i + Fact(t) \{A_i^z + W_i^z\}] N_i^z(t) \quad (1)$$

dengan:

- $i, j, k$  : nomor nuklida yang mengalami deplesi
- $z$  : nomor region burn-up
- $N$  : densitas atom nuklida *burn-up*
- $\lambda, f$  : konstanta peluruhan dan rasio percabangan
- $g, \gamma, h$  : fraksi hasil (*yield*) dari masing-masing transmudasi
- $F$  : tampang lintang mikroskopik relatif dari laju reaksi fisi
- $A$  : tampang lintang mikroskopik relatif dari laju serapan
- $C$  : tampang lintang mikroskopik relatif dari laju tangkapan
- $W$  : tampang lintang mikroskopik relatif dari laju reaksi (n,2n)
- $Fact$  : faktor normalisasi untuk mengkonversi laju reaksi relatif menjadi nilai absolut

Dari pers. (1) dapat ditarik suatu narasi bahwa suatu nuklida  $i$  dapat terbentuk oleh proses peluruhan nuklida  $j$ , tangkapan neutron oleh nuklida  $k$ , proses reaksi fisi, dan reaksi (n,2n). Pada saat yang sama, nuklida  $i$  berkurang akibat proses peluruhan dirinya sendiri, penyerapan neutron sehingga berubah menjadi nuklida lain, dan reaksi (n,2n) yang mengubah dirinya menjadi nuklida yang lebih ringan.

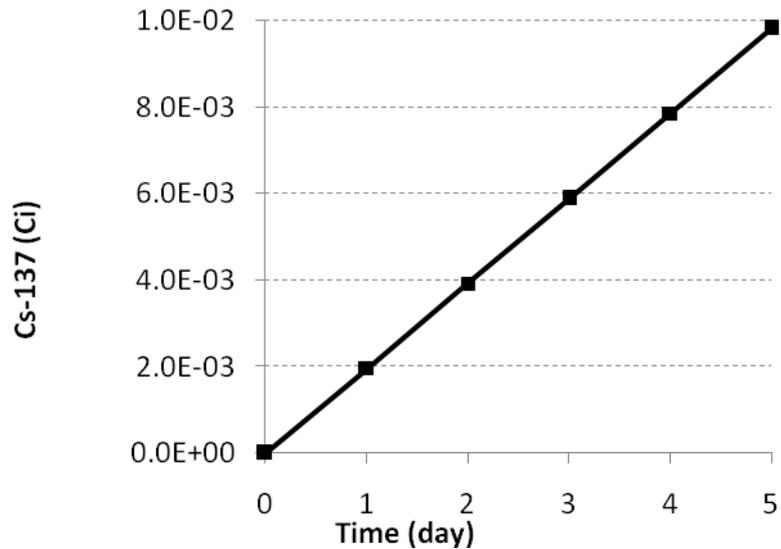
## HASIL DAN PEMBAHASAN

Perhitungan inventori produk fisi pada fasilitas uji SAMOP telah dilakukan dengan menggunakan *code* MCNPX selama 5 hari operasi. Perhatian utama ditujukan pada lima produk fisi yang berpotensi berdampak terhadap lingkungan jika terjadi lepasan baik akibat kesalahan penanganan tabung bahan bakar saat ekstraksi Mo-99 maupun kecelakaan saat transportasi. Informasi kandungan produk fisi pada masing-masing tabung sangat penting untuk memperkirakan paparan maksimum jika pada suatu tabung tertentu terjadi kerusakan yang menyebabkan pelepasan produk fisi. Proyeksi kandungan produk fisi setelah proses produksi Mo-99 (*shutdown*) dapat dihitung dengan diketahuinya waktu paruh masing-masing produk fisi, seperti pada Tabel 2.

Tabel 2. Waktu paruh beberapa produk fisi dan mode peluruhannya

Produk Fisi	Waktu Paruh	Mode Peluruhan
Cs-137	30,2 tahun	$\beta^- \rightarrow$ Ba-137
Kr-85	10,73 tahun	$\beta^- \rightarrow$ Rb-85
I-135	6,57 jam	$\beta^- \rightarrow$ Xe-135
I-131	8,04 hari	$\beta^- \rightarrow$ Xe-131
Sr-90	29,1 tahun	$\beta^- \rightarrow$ Y-90

Gambar 3 menunjukkan akumulasi produk fisi Cs-137 selama 5 hari operasi SAMOP dengan daya total 600 W. Secara umum pembentukan Cs-137 dari proses fisi bersifat linier terhadap *burnup* bahan bakar. Pada hari ke-5 akumulasi total Cs-137 adalah  $9,816 \times 10^{-3}$  Ci.



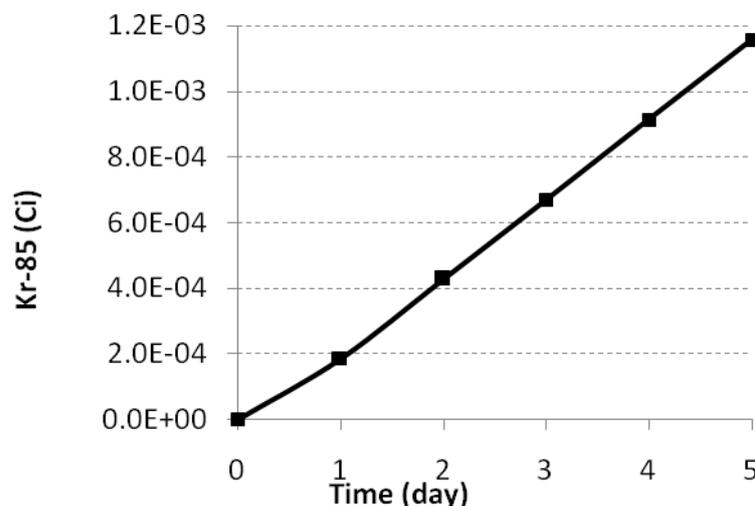
Gambar 3. Konsentrasi Cs-137 selama 5 hari operasi SAMOP

Kandungan Cs-137 pada masing-masing silinder larutan bahan bakar secara rinci dapat dilihat pada Tabel 3. Dari tabel tersebut terlihat bahwa silinder anular mengandung paling banyak Cs-137, karena silinder tersebut memiliki volume terbesar. Namun konsentrasi terbesar terdapat pada silinder pusat (*central cylinder*), yaitu  $8,137 \times 10^{-7}$  Ci/cm<sup>3</sup>.

Tabel 3. Konsentrasi Cs-137 (Ci) pada masing-masing tabung bahan bakar

	Hari				
	1	2	3	4	5
Annular cylinder	$1,821 \times 10^{-3}$	$3,644 \times 10^{-3}$	$5,465 \times 10^{-3}$	$7,289 \times 10^{-3}$	$9,108 \times 10^{-3}$
Central cylinder	$3,676 \times 10^{-5}$	$7,347 \times 10^{-5}$	$1,101 \times 10^{-4}$	$1,471 \times 10^{-4}$	$1,839 \times 10^{-4}$
Cyl 1, 2, 3, 4, 5, and 6	$1,746 \times 10^{-5}$	$3,487 \times 10^{-5}$	$5,226 \times 10^{-5}$	$6,954 \times 10^{-5}$	$8,696 \times 10^{-5}$
Total	$1,962 \times 10^{-3}$	$3,927 \times 10^{-3}$	$5,890 \times 10^{-3}$	$7,855 \times 10^{-3}$	$9,816 \times 10^{-3}$

Perubahan konsentrasi Kr-85 selama 5 hari operasi SAMOP hampir mendekati kecenderungan yang linier, sebagaimana terlihat pada Gambar 4. Di akhir operasi hari ke-5, total produk fisi Kr-85 yang terbentuk sebanyak  $1,156 \times 10^{-3}$  Ci, dengan kandungan dominan berada pada tabung anular sebesar 92,8 %.



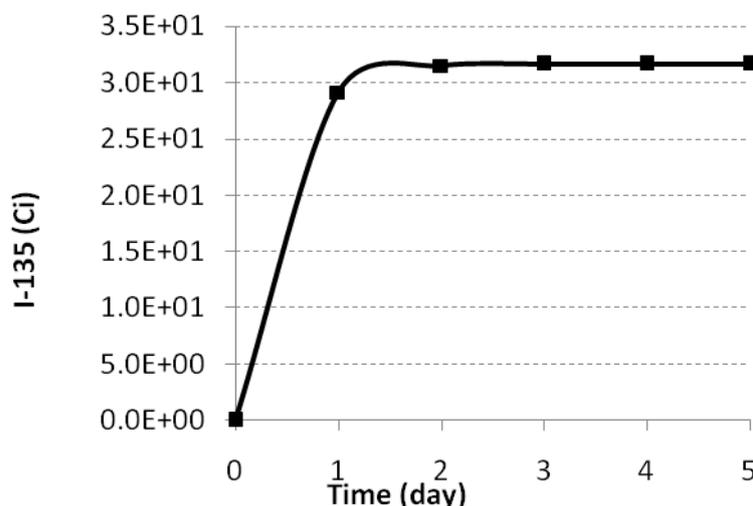
Gambar 4. Konsentrasi Kr-85 selama 5 hari operasi SAMOP

Distribusi Kr-85 pada masing-masing tabung dapat dilihat pada Tabel 4. Karena tabung pusat mendapatkan paparan fluks neutron yang paling tinggi, maka konsentrasi Kr-85 terbesar berada pada tabung tersebut, yaitu  $9,588 \times 10^{-8}$  Ci/cm<sup>3</sup>.

Tabel 4. Konsentrasi Kr-85 (Ci) pada masing-masing tabung bahan bakar

	Hari				
	1	2	3	4	5
Annular cylinder	$1,721 \times 10^{-4}$	$3,964 \times 10^{-4}$	$6,219 \times 10^{-4}$	$8,476 \times 10^{-4}$	$1,073 \times 10^{-3}$
Central cylinder	$3,475 \times 10^{-6}$	$7,998 \times 10^{-6}$	$1,254 \times 10^{-5}$	$1,711 \times 10^{-5}$	$2,167 \times 10^{-5}$
Cyl 1, 2, 3, 4, 5, and 6	$1,650 \times 10^{-6}$	$3,796 \times 10^{-6}$	$5,950 \times 10^{-6}$	$8,094 \times 10^{-6}$	$1,025 \times 10^{-5}$
Total	$1,855 \times 10^{-4}$	$4,272 \times 10^{-4}$	$6,703 \times 10^{-4}$	$9,135 \times 10^{-4}$	$1,156 \times 10^{-3}$

Gambar 5 menunjukkan perubahan konsentrasi produk fisi I-135 selama 5 hari operasi SAMOP. Konsentrasi I-135 mencapai tingkat saturasi (jenuh) setelah melewati hari ke-1. Hal ini disebabkan karena isotop I-135 yang diproduksi sama dengan yang mengalami peluruhan. Peluruhan I-135 berlangsung jauh lebih cepat dari pada isotop lain karena umur paruhnya yang sangat pendek, yaitu 6,57 jam (Tabel 2). Ini juga berarti konsentrasi I-135 akan cepat hilang setelah reaktor *shutdown*.



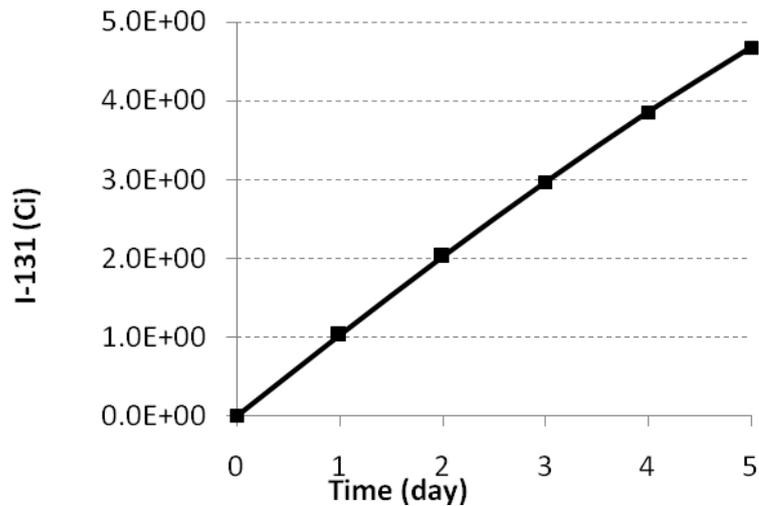
Gambar 5. Konsentrasi I-135 selama 5 hari operasi SAMOP

Konsentrasi I-135 pada masing-masing tabung tertera pada Tabel 5. Kandungan I-135 paling banyak berada pada tabung anular, sebesar  $2,934 \times 10^1$  Ci. Namun, kerapatan I-135 maksimum berada di tabung tengah sebesar  $2,62 \times 10^{-3}$  Ci/cm<sup>3</sup>. Total pada delapan tabung terdapat  $3,163 \times 10^1$  Ci.

Tabel 5. Konsentrasi I-135 (Ci) pada masing-masing tabung bahan bakar

	Hari				
	1	2	3	4	5
Annular cylinder	$2,702 \times 10^1$	$2,919 \times 10^1$	$2,935 \times 10^1$	$2,939 \times 10^1$	$2,934 \times 10^1$
Central cylinder	$5,452 \times 10^{-1}$	$5,880 \times 10^{-1}$	$5,906 \times 10^{-1}$	$5,956 \times 10^{-1}$	$5,931 \times 10^{-1}$
Cyl 1, 2, 3, 4, 5, and 6	$2,590 \times 10^{-1}$	$2,788 \times 10^{-1}$	$2,802 \times 10^{-1}$	$2,788 \times 10^{-1}$	$2,807 \times 10^{-1}$
Total	$2,912 \times 10^1$	$3,146 \times 10^1$	$3,163 \times 10^1$	$3,167 \times 10^1$	$3,163 \times 10^1$

Gambar 6 menunjukkan perubahan konsentrasi I-131 pada delapan tabung bahan bakar SAMOP. Dari grafik tersebut terlihat kecenderungan yang akan mengarah pada kondisi saturasi pada suatu hari tertentu, seperti pada grafik I-135. Hal ini dapat dipahami karena I-131 memiliki waktu paruh yang relatif pendek dalam orde hari, yaitu 8,04 hari.



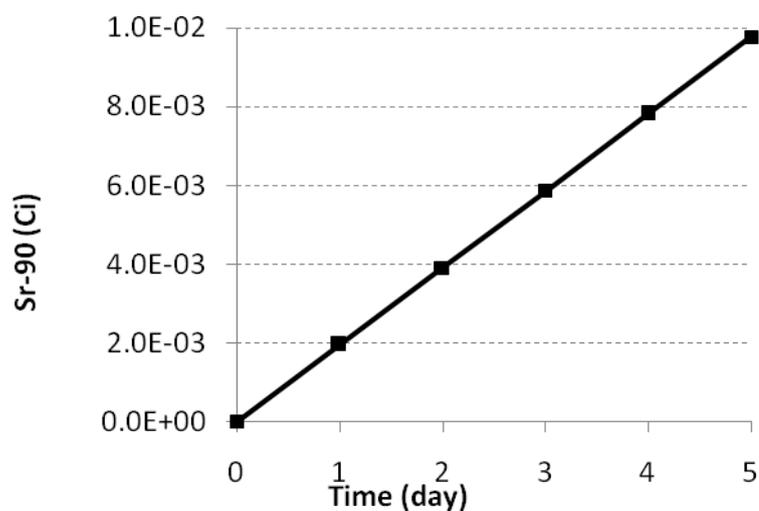
Gambar 6. Konsentrasi I-131 selama 5 hari operasi SAMOP

Tabel 6 merinci konsentrasi I-131 pada masing-masing tabung SAMOP. Total kandungan I-131 pada hari ke-5 adalah 4,675 Ci, dengan konsentrasi tertinggi pada tabung tengah sebesar  $3,87 \times 10^{-4}$  Ci/cm<sup>3</sup>.

Tabel 6. Konsentrasi I-131 (Ci) pada masing-masing tabung bahan bakar

	Hari				
	1	2	3	4	5
Annular cylinder	$9,511 \times 10^{-1}$	1,876	2,753	3,575	4,338
Central cylinder	$1,919 \times 10^{-2}$	$3,781 \times 10^{-2}$	$5,545 \times 10^{-2}$	$7,214 \times 10^{-2}$	$8,756 \times 10^{-2}$
Cyl 1, 2, 3, 4, 5, and 6	$9,116 \times 10^{-3}$	$1,794 \times 10^{-2}$	$2,631 \times 10^{-2}$	$3,410 \times 10^{-2}$	$4,140 \times 10^{-2}$
Total	1,025	2,022	2,967	3,853	4,675

Gambar 7 memperlihatkan perubahan total aktivitas Sr-90 pada delapan tabung SAMOP selama 5 hari operasi yang menunjukkan kecenderungan yang linier. Dengan waktu paruh yang 29,1 tahun, maka suku peluruhan sangat kecil sehingga perubahan konsentrasi didominasi oleh pembentukan dari proses fisi uranium.



Gambar 7. Konsentrasi Sr-90 selama 5 hari operasi SAMOP

Dari Tabel 7, total aktivitas Sr-90 pada delapan tabung adalah  $9,767 \times 10^{-3}$  Ci, dengan konsentrasi maksimum berada pada tabung tengah sebesar  $8,097 \times 10^{-7}$  Ci/cm<sup>3</sup>. Sedangkan kandungan Sr-90 terbesar berada pada tabung anular  $9,062 \times 10^{-3}$  Ci.

Tabel 7. Konsentrasi Sr-90 (Ci) pada masing-masing tabung bahan bakar

	Hari				
	1	2	3	4	5
Annular cylinder	$1,812 \times 10^{-3}$	$3,625 \times 10^{-3}$	$5,438 \times 10^{-3}$	$7,252 \times 10^{-3}$	$9,062 \times 10^{-3}$
Central cylinder	$3,659 \times 10^{-5}$	$7,313 \times 10^{-5}$	$1,096 \times 10^{-4}$	$1,464 \times 10^{-4}$	$1,830 \times 10^{-4}$
Cyl 1, 2, 3, 4, 5, and 6	$1,738 \times 10^{-5}$	$3,470 \times 10^{-5}$	$5,201 \times 10^{-5}$	$6,921 \times 10^{-5}$	$8,655 \times 10^{-5}$
Total	$1,953 \times 10^{-3}$	$3,907 \times 10^{-3}$	$5,861 \times 10^{-3}$	$7,816 \times 10^{-3}$	$9,767 \times 10^{-3}$

## KESIMPULAN

Perhitungan produk fisi yang penting dalam rangka mengantisipasi terjadinya pelepasan jika terjadi kegagalan tabung SAMOP telah dilakukan dengan menggunakan code MCNPX. Perhatian utama diarahkan pada lima produk fisi Cs-137, Kr-85, I-135, I-131 dan Sr-90 setelah 5 hari operasi. Total produk fisi Cs-137, Kr-85, I-135, I-131 dan Sr-90 masing-masing adalah  $9,816 \times 10^{-3}$ ;  $1,16 \times 10^{-3}$ ;  $3,16 \times 10^1$ ; 4,68 dan  $9,77 \times 10^{-3}$  Ci. Kandungan paling besar terdapat pada tabung anular yang memiliki volume terbesar, sedangkan konsentrasi aktivitas volumetrik tertinggi ada pada tabung tengah yang terpapar fluks neutron paling tinggi.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada bapak Syarip dari PSTA-BATAN atas informasinya tentang spesifikasi teknis fasilitas uji SAMOP.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Khakim Azizul, Syarip, and Suharyana, "Karakteristik Neutronik Sistem SAMOP (Subcritical Assembly for Mo-99 Production)," in *Prosiding Seminar Keselamatan Nuklir 2017*, 2017, pp. 113–119.
- [2] H. Acar, C. Bahri, and F. Bayrak, "Effects of the Chernobyl Disaster on Thyroid Cancer Incidence in Turkey after 22 Years," *ISRN Surg.*, vol. 2011, pp. 1–3, 2011.
- [3] B. S. Sha Xue, "Modeling and experiment of fission products release and interaction with coolant for defective fuel in Light Water Reactor (LWR)," The Ohio State University, 2017.
- [4] Y. Pontillon, G. Ducros, and P. P. Malgouyres, "Behaviour of fission products under severe PWR accident conditions VERCORS experimental programme — Part 1: General description of the programme," *Nucl. Eng. Des.*, vol. 240, pp. 1843–1852, 2010.
- [5] Syarip and T. Nugroho, "Analisis Termohidrolik Fasilitas Eksperimen SAMOP (Reaktor Subkritik Produksi Isotop Mo-99)," *J. Pengemb. Energi Nukl.*, vol. 19, no. 1, pp. 25–31, 2017.
- [6] Syarip, E. Togatorop, and Yassar, "Molybdenum-99 production calculation analysis of SAMOP reactor based on thorium nitrate fuel," *J. Phys.*, vol. 978, 2018.
- [7] X-5 Monte Carlo Team, "MCNP — A General Monte Carlo N-Particle Transport Code Version 5." 2003.
- [8] L. Snoj and M. Ravnik, "Calculation of Power Density with MCNP in TRIGA reactor," in *Int. conf. Nuclear Energy for New Europe*, 2006, pp. 1–6.
- [9] D. B. Pelowitz, "MCNPX Ver.2.7.0 User's Manual." 2011.

## KAJIAN TEKNIS KLASIFIKASI SISTEM, STRUKTUR DAN KOMPONEN (SSK) REAKTOR NUKLIR

Arifin M. Susanto<sup>1</sup>, Bintoro Aji<sup>1</sup>, Catur Febriyanto<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Pusat Pengkajian Sistem Teknologi Pengawasan Reaktordan Bahan Nuklir – P2STPIBN BAPETEN.

<sup>2</sup> Direktorat Pengaturan Instalasi dan Bahan Nuklir – DPIBN BAPETEN

email: a.msusanto@bapeten.go.id

### ABSTRAK

**KAJIAN TEKNIS KLASIFIKASI SISTEM, STUKTUR DAN KOMPONEN (SSK) REAKTOR NUKLIR.** Telah dilakukan suatu kajian untuk mengidentifikasi metode dalam mengklasifikasi struktur, sistem, dan komponen (SSK) reaktor nuklir. Pengklasifikasian SSK akan menentukan kualitas, proses manufaktur, standar yang digunakan, dan inspeksi badan pengawas karena mencakup risiko dan konsekuensi yang dibebankan oleh SSK tersebut. Makalah ini menampilkan metodologi pengklasifikasian SSK untuk reaktor nuklir, dengan membandingkan dan menambahkan dari berbagai sumber dan pengalaman yang ada. Sumber rujukan metode klasifikasi SSK secara luas tersedia dan tersebar dengan karakteristik masing-masing, sehingga kajian ini mencoba menformulasikan metode yang baik dan mudah dipahami. Hingga saat ini belum terdapat acuan baik peraturan maupun pedoman dalam mengklasifikasi SSK reaktor nuklir, sehingga hasil kajian dapat digunakan sebagai solusi dalam mengklasifikasikan SSK reaktor nuklir. Namun memerlukan pemahaman yang baik dalam mengaplikasikannya. Kajian ini diharapkan dapat digunakan dalam penyusunan peraturan atau pedoman dalam klasifikasi SSK.

Kata kunci: klasifikasi, SSK, reaktor nuklir

### ABSTRACT

**TECHNICAL ASSESSMENT ON NUCLEAR REACTOR SYSTEMS, STRUCTURES AND COMPONENTS (SSC) CLASSIFICATION.** A study has been carried out to identify classification of structures, systems, and components for nuclear reactor. Classification of SSC will lead to selection of quality, manufacturing process, code and standard being used, as well as regulatory inspection as correspond to risk and consequence imposed to its SSC. The paper presents SSC classification methodology for nuclear reactors which comparing and supplementing of each source available as well as good practice from industry. The reference sources of SSC classification methods are widely available and scattered with their respective characteristics, so this study attempts to formulate good and understandable methods. Up to now, there is no guidance or regulation covered on SSC classification issue, so the result of this paper could be used as a solution to solve the problem which is to classify SSC, nonetheless a good knowing & understanding is required. However, the paper by the end will be used to draft SSC classification regulation.

Keyword: classification, SSC, nuclear reactor

### PENDAHULUAN

Sistem, struktur, dan komponen (SSK) merupakan terminologi yang umum untuk menyatakan seluruh elemen pada fasilitas yang berkontribusi pada fungsi proteksi dan keselamatan.

Klasifikasi keselamatan SSK adalah proses penentuan kelas keselamatan dari sistem dan komponen serta instrumen lain yang digunakan berdasarkan pada fungsi dan signifikansi pada keselamatan ke dalam kelas-kelas keselamatan. Kelas keselamatan adalah sistem dan komponen pada instrumen yang memiliki fungsi dasar keselamatan dan signifikansi keselamatan. Kelas keselamatan menentukan persyaratan mutu yang diaplikasikan pada SSK dari fasilitas dan penjaminan mutunya. Fungsi keselamatan dapat diartikan sebagai tujuan khusus yang harus dipenuhi untuk menjaga keselamatan dari fasilitas atau kegiatan sehingga terhindar dari konsekuensi radiologi pada operasi normal, kejadian operasi terantisipasi dan kondisi kecelakaan [1].

Salah satu prasyarat desain yaitu kegagalan pada kelas keselamatan yang lebih rendah tidak berpengaruh signifikan pada sistem keselamatan pada kelas yang lebih tinggi.

Masing-masing instrumen yang memiliki lebih dari satu fungsi harus diklasifikasi berdasarkan kelas keselamatan yang konsisten terhadap tingkat kepentingan fungsi masing-masing instrumen.

Tujuan dari klasifikasi SSK adalah untuk menentukan bagian dari struktur, sistem, dan komponen yang dibutuhkan untuk melindungi masyarakat dan lingkungan dari efek bahaya radiasi pengion. Hal ini dilakukan dengan menentukan peran SSK untuk mencegah kecelakaan atau membatasi konsekuensi radiologi ketika kecelakaan nuklir terjadi. Berdasarkan klasifikasinya, SSK dirancang, diproduksi, dikonstruksi, dipasang, dioperasikan, diinspeksi, dan dijaga untuk memastikan bahwa seluruh proses sesuai dengan spesifikasi desain dan tingkat ekspektasi unjuk kerja keselamatan yang dicapai.

Dalam Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 54 tahun 2012 tentang Keselamatan dan Keamanan reactor nuklir [2] pasal 13 ayat 1 "...pemegang izin wajib menetapkan klasifikasi struktur, sistem, dan komponen instalasi nuklir." dan dalam ayat 2 "Klasifikasi sebagaimana dimaksud pada ayat (1) dilakukan berdasarkan kelas keselamatan, kelas mutu, dan/atau kelas seismik"[2]. Hingga makalah ini dibuat belum ada turunan peraturan yang mengatur tata cara atau metodologi pengklasifikasian SSK yang dipersyaratkan, sehingga kajian ini menjadi penting sebagai solusi dalam terwujudnya penyusunan Perka tersebut.

Beberapa dokumen internasional secara tersebar memberikan metodologi yang umum dipakai sesuai standar yang mereka gunakan dalam mengklasifikasikan SSK reaktor nuklir. Pengalaman mereka mengoperasikan/membangun reaktor nuklir mengembangkan metodologi klasifikasi SSK sesuai pengalaman baik masing-masing negara pemilik reaktor nuklir. Sehingga kajian ini menggunakan metodologi dalam membuat klasifikasinya SSK berdasarkan beberapa pengalaman negara pemilik untuk di jadikan usulan sebagai metodologi mengklasifikasikan SSK di Indonesia.

Diharapkan kajian ini memberikan gambaran bagaimana proses klasifikasi SSK yang umum dilakukan di negara pemilik PLTN, sehingga dapat digunakan dalam menyusun pedoman yang berlaku.

Tujuan makalah ini memberikan metodologi proses klasifikasi SSK untuk reaktor nuklir yang dapat diacu sebagai bahan draft penyusunan Peraturan Kepala BAPETEN tentang klasifikasi SSK.

## **POKOK BAHASAN**

### **Umum**

Klasifikasi struktur, sistem, dan komponen harus menggunakan metode yang jelas dan konsisten. Hal ini dilakukan untuk menjaga mutu dan keandalan dari proses klasifikasi. SSK harus diidentifikasi dengan berdasarkan pada kriteria berikut: Fungsi keselamatan yang dilakukan; Konsekuensi kegagalan; Probabilitas penggunaan SSK sebagai fungsi keselamatan; Waktu yang dibutuhkan saat terjadinya kejadian awal terpostulasi dan perkiraan durasi operasi fungsi keselamatan.

Fungsi keselamatan penting dari SSK meliputi sistem keselamatan; fitur desain pendukung; sistem pendukung keselamatan; SSK lain yang kegagalannya dapat menimbulkan insiden keselamatan (misalnya sistem proses dan kendali).

Metodologi klasifikasi signifikansi keselamatan SSK terhadap keselamatan harus menggunakan metode deterministik, dilengkapi (komplementer) dengan metode probabilistik dan penilaian teknis (*engineering judgement*) jika memungkinkan. Klasifikasi keselamatan SSK merupakan proses iteratif yang dilakukan terus menerus selama proses perancangan.

Klasifikasi proses SSK meliputi: Kajian dan definisi kejadian awal terpostulasi (PIE) ; Pengelompokan dan identifikasi batasan PIE; Identifikasi fungsi keselamatan spesifik untuk mencegah atau mengurangi PIE; Klasifikasi fungsi keselamatan yang terkait dengan signifikansi keselamatan dan peran dalam mencapai fungsi dasar keselamatan ; Identifikasi SSK yang memberikan fungsi keselamatan; Klasifikasi SSK sesuai dengan kelas keselamatan dan kategori keselamatan; Verifikasi klasifikasi SSK; Identifikasi peraturan dasar desain keteknikan untuk SSK yang telah diklasifikasikan.

Proses klasifikasi dimulai dengan proses pemahaman desain, analisis keselamatan, dan mekanisme mencapai fungsi keselamatan. Fungsi dan desain dari masing-masing SSK dibutuhkan untuk mengidentifikasi fungsi keselamatan utama secara sistematis pada setiap kondisi, termasuk kondisi operasi normal. Informasi dari penilaian keselamatan digunakan untuk menentukan PIE. Fungsi tersebut kemudian digunakan sebagai dasar kategorisasi dan klasifikasi berdasarkan signifikansi pada keselamatan. Proses kategorisasi keselamatan

merupakan proses penyusunan berdasarkan kategori SSK. SSK pada masing-masing fungsi diklasifikasi dan diidentifikasi berdasarkan pada peran untuk mencapai fungsi keselamatan tersebut.

Berdasarkan Undang-Undang No. 10 tahun 1997 tentang Ketenaganukliran Bab I Ketentuan Umum Pasal 1 nomor 12 menyatakan bahwa reaktor nuklir adalah:

- a. reaktor nuklir;
- b. fasilitas yang digunakan untuk pemurnian, konversi, pengayaan bahan nuklir, fabrikasi bahan bakar nuklir dan/atau pengolahan ulang bahan bakar nuklir bekas; dan/atau
- c. fasilitas yang digunakan untuk menyimpan bahan bakar nuklir dan bahan bakar nuklir bekas.

Bagian-bagian dalam suatu reaktor nuklir dapat dikelompokkan menjadi dua yaitu bagian yang penting untuk keselamatan dan bagian yang tidak penting untuk keselamatan. Bagian-bagian yang penting untuk keselamatan adalah bagian (*item*) yang apabila mengalami kegagalan dapat mengakibatkan paparan radiasi kepada personil fasilitas nuklir atau masyarakat. Bagian yang penting untuk keselamatan selanjutnya dapat dikelompokkan menjadi dua yaitu bagian terkait keselamatan dan sistem keselamatan.

Klasifikasi peralatan dalam reaktor nuklir ditunjukkan pada gambar 1 dibawah.

Bagian-bagian yang penting untuk keselamatan meliputi: struktur, sistem, dan komponen (SSK) yang apabila mengalami malfungsi kegagalannya dapat menyebabkan paparan radiasi kepada personel fasilitas atau publik; SSK tersebut yang mencegah kejadian operasional terantisipasi untuk menjadi kondisi kecelakaan; Fitur yang diberikan untuk mengurangi konsekuensi dari malfungsi atau kegagalan dari struktur, sistem, dan komponen.



\*Bagian (*item*) mengacu pada Struktur, Sistem, dan Komponen (SSK)

Gambar 1. Klasifikasi Peralatan Reaktor Nuklir

Sistem keselamatan merupakan bagian-bagian yang diperlukan untuk menjamin keselamatan operasi instalasi. Sistem keselamatan dalam suatu reaktor nuklir diperlukan untuk menjamin dapat dilakukan pemadaman secara selamat, pembuangan panas sisa dari teras reaktor, atau untuk pembatasan konsekuensi dari kejadian operasi terantisipasi dan kecelakaan dasar desain. Sistem keselamatan terdiri dari tiga bagian yaitu sistem proteksi, sistem penggerak keselamatan dan fitur pendukung sistem keselamatan. Komponen dari sistem keselamatan dapat diperlukan sepenuhnya untuk menjaga fungsi keselamatan atau menjaga fungsi keselamatan pada beberapa keadaan operasi dan fungsi lainnya bukan untuk keselamatan pada keadaan operasi lainnya.

### Persyaratan Dasar

Pendekatan dari struktur dan metode untuk identifikasi dan klasifikasi SSK yang penting untuk keselamatan adalah atas dasar fungsinya dan signifikasinya terhadap keselamatan. Setelah SSK diklasifikasi, maka aturan teknis yang cukup dapat diaplikasikan untuk menjamin bahwa proses desain, manufaktur, konstruksi, pemasangan, komisioning, operasi, pengujian, inspeksi dan perawatan dari SSK dapat dilakukan dengan mutu yang cukup untuk memenuhi fungsi seperti yang diharapkan sesuai dengan persyaratan keselamatan.

Persyaratan dasar untuk klasifikasi telah ditetapkan dalam dokumen IAEA Nuclear Safety Series nomor SSR-2/1 (Rev. 1) tahun 2016 tentang "Keselamatan Desain PLTN" [3] serta dokumen IAEA GSR bagian 4 tahun 2009 tentang "Kajian Keselamatan untuk Fasilitas

dan Aktivitas”[4]. Identifikasi SSK perlu dilakukan oleh pemegang izin ketika akan melakukan izin konstruksi dan operasi berdasarkan Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 2 tahun 2014 tentang “Perizinan Reaktor Nuklir dan Pemanfaatan Bahan Nuklir [11], seperti tercantum dalam penjelasan pasal 9 tentang Laporan Analisis Keselamatan (LAK). Penjelasan lebih rinci tentang isi LAK dijelaskan pada Perka BAPETEN Nomor 3 Tahun 2011 tentang “Ketentuan Keselamatan Desain Reaktor Daya” [5] dan Perka nomor 10 tahun 2006 tentang “Pedoman Penyusunan Laporan Analisis Keselamatan Instalasi Nuklir Non-reaktor”[6]. Lebih lanjut diperlukan pedoman untuk penyusunan klasifikasi SSK tersebut.

### **Persyaratan Keselamatan**

#### *Persyaratan Umum Keselamatan Reaktor Nuklir*

Persyaratan keselamatan terdiri dari persyaratan umum dan persyaratan khusus. Persyaratan umum untuk keselamatan reaktor nuklir dinyatakan dalam PP No 54 Tahun 2012 tentang Keselamatan dan Keamanan Reaktor Nuklir [10] pada pasal 11 yang meliputi: keandalan struktur, sistem, dan komponen; kemudahan operasi, inspeksi, perawatan, dan pengujian; kesiapsiagaan dan penanggulangan kedaruratan nuklir; kemudahan dekomisioning; proteksi radiasi; untuk faktor manusia; dan untuk meminimalkan penuaan. Persyaratan khusus dibedakan untuk reaktor nuklir dan untuk instalasi nuklir non-reaktor.

#### *Persyaratan Khusus Keselamatan Reaktor Nuklir*

Persyaratan keselamatan desain reaktor nuklir meliputi paling sedikit: teras reaktor; sistem pemindahan panas; sistem shutdown; sistem proteksi reaktor; fitur keselamatan teknis; sistem pengungkung; sistem instrumentasi dan kendali; sistem penanganan dan penyimpanan bahan bakar nuklir; sistem pengelolaan limbah radioaktif; dan sistem bantu. Pemenuhan persyaratan harus dilakukan dengan menetapkan klasifikasi struktur, sistem dan komponen.

Sistem, struktur dan komponen reaktor nuklir dikelompokkan ke dalam kelas keselamatan 1, 2, 3, 4 dan kelas non-nuklir. Kelas keselamatan menentukan persyaratan kualitas yang diterapkan pada SSK dan penjaminan kualitasnya.

Persyaratan keselamatan sebagai dasar dalam proses klasifikasi SSK dapat juga mengacu pada dokumen SSR 2-1 (rev. 1) tentang aspek desain keselamatan PLTN [3].

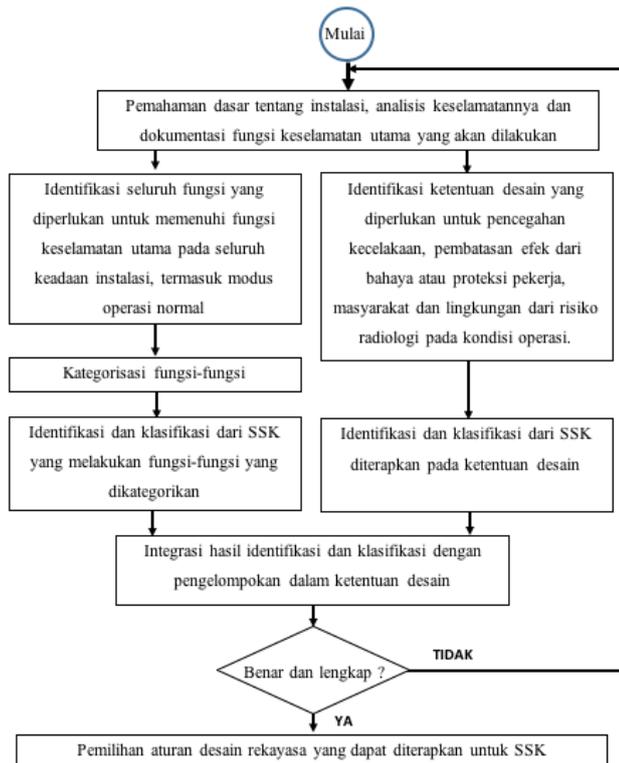
### **Metode Proses Klasifikasi**

Pedoman keselamatan disarankan seperti pada struktur proses untuk identifikasi dan klasifikasi SSK, seperti ditampilkan pada Gambar 2.

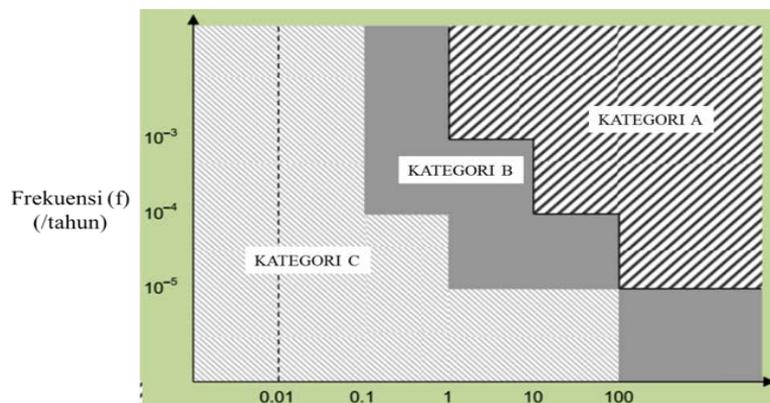
Proses untuk klasifikasi seluruh SSK menurut fungsinya yang signifikan terhadap keselamatan harus memperhitungkan hal-hal berikut: Desain reaktor dan fitur keselamatan melekat; Daftar seluruh kejadian awal terpostulasi. Frekuensi terjadinya kejadian awal terpostulasi, seperti yang dipertimbangkan dalam desain reaktor nuklir harus diperhitungkan.

Tahapan selanjutnya dalam proses adalah penentuan klasifikasi keselamatan dari seluruh SSK yang penting untuk keselamatan. Metode deterministik harus secara umum diaplikasikan, dilengkapi kajian keselamatan probabilistik yang cukup dan pertimbangan teknis untuk mencapai profil risiko yang cukup, misalnya desain reaktor untuk kejadian dengan level konsekuensi keparahan yang tinggi memiliki frekuensi kejadian terprediksi sangat rendah. Penjelasan menyeluruh tentang fungsi keselamatan dalam kaitannya dengan frekuensi kejadian dan konsekuensi kejadian dapat dilihat pada Gambar 3.

Dua faktor utama dari penentuan klasifikasi keselamatan dengan metode deterministik adalah: Konsekuensi apabila fungsi keselamatan tidak menjalankan fungsinya; dan kebolehjadian penggunaan fungsi keselamatan.

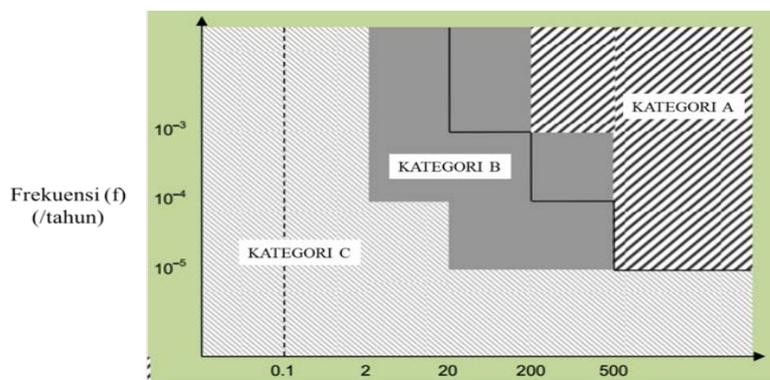


Gambar 2. Diagram Alir Proses Klasifikasi [5].



Konsekuensi Dosis Radiologis di Luar Fasilitas (DL) (mSv)

*Frekuensi (f) adalah frekuensi total kebutuhan penggunaan fungsi keselamatan  
 Konsekuensi dosis radiologis di luar fasilitas (DL) adalah konsekuensi radiologis yang diterima apabila terjadi kegagalan fungsi keselamatan yang tidak termitigasi dan terproteksi di luar fasilitas nuklir*



Konsekuensi Dosis Radiologis di dalam fasilitas (DD) (mSv)

Gambar 3. Daerah frekuensi/konsekuensi untuk kategorisasi fungsi

keselamatan dalam dan luar fasilitas [8]

## HASIL DAN PEMBAHASAN

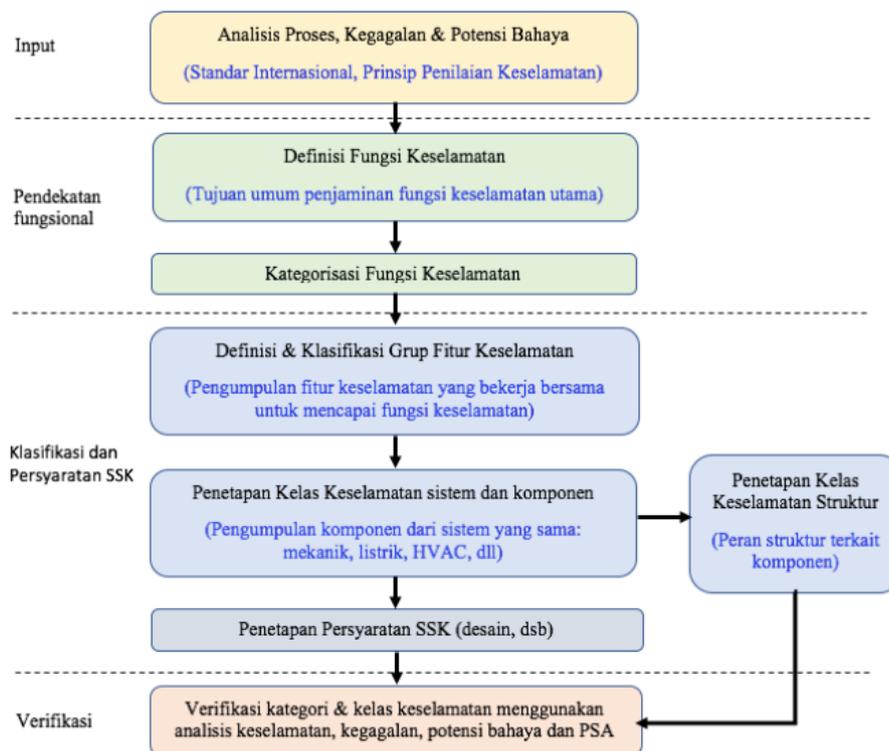
Fungsi-fungsi dan SSK yang akan dikategorikan dan diklasifikasikan merupakan semua fungsi penting yang digunakan untuk memastikan bahwa operasi fasilitas berlangsung aman dan melindungi masyarakat dari bahaya radiasi pengion.

Lebih lanjut dijelaskan tentang kelas keselamatan yaitu sebagai klasifikasi SSK berdasarkan fungsi keselamatan dan pentingnya terhadap keselamatan. Kelas mutu merupakan klasifikasi SSK berdasarkan kendali pemenuhan persyaratan desain dan aspek jaminan mutu pada tahap desain, konstruksi termasuk manufaktur dan pemasangan peralatan, komisioning, dan operasi. Kelas seismik adalah klasifikasi SSK berdasarkan kebutuhan tetap berfungsinya SSK tersebut selama gempa dengan skala keparahan tertentu, serta mempertimbangkan kondisi paska gempa dan kemungkinan perambatan kerusakan.

### Metode Klasifikasi Keselamatan

Metodologi klasifikasi dapat dibedakan dalam empat bagian yaitu: identifikasi masukan/input untuk proses klasifikasi, kategorisasi fungsi keselamatan, klasifikasi fitur keselamatan grup, sistem fitur keselamatan dan komponen, penetapan persyaratan pada fitur keselamatan grup, sistem, fitur keselamatan, dan komponen.

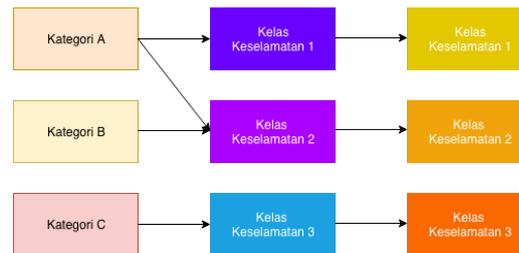
Proses klasifikasi iteratif diterapkan mulai dari tahapan desain konseptual, kemudian dinilai selama sub-tahapan desain seperti dijelaskan pada Gambar 4 di bawah.



Gambar 4. Tahapan Klasifikasi Keselamatan [4].

Proses klasifikasi dilakukan dari sistem kemudian mengerucut sampai dengan komponen didasarkan pada fungsi keselamatan yang disediakan sebagai input. Verifikasi dilakukan untuk menentukan diklasifikasi atau tidak diklasifikasi terkait dengan keselamatan.

Proses klasifikasi SSK yang diawali dari kategorisasi fungsi yang dijalankan oleh grup fitur keselamatan atau *safety feature group* (SFG). Kelas keselamatan ditetapkan yang dapat dipenuhi sesuai kategori SFG tersebut dan dilanjutkan dengan penentuan kelas keselamatan yang dapat dipenuhi untuk tiap komponen, yang ditunjukkan gambar 5.



Gambar 5. Proses Klasifikasi [5]

## Klasifikasi Keselamatan SSK Reaktor Nuklir

### Identifikasi Fungsi

Istilah fungsi melingkupi fungsi primer dan segala fungsi pendukung lainnya yang diharapkan untuk beroperasi mendukung fungsi primer. Fungsi dikategorikan berdasarkan kemampuannya untuk mencapai fungsi keselamatan utama dari berbagai macam kondisi reaktor nuklir, termasuk semua modus saat operasi normal. Fungsi tersebut utamanya yang dicantumkan dalam analisis keselamatan dan harus menyertakan fungsi yang dijalankan pada kelima level pertahanan berlapis (*defence in depth*) misalnya fungsi keselamatan pencegahan, pendeteksian, kontrol, dan mitigasi. Meskipun fungsi keselamatan utama yang harus dipenuhi adalah sama untuk setiap kondisi fasilitas nuklir, tetapi fungsi-fungsi yang harus dikategorikan tersebut harus dilakukan identifikasi pada masing-masing kondisi fasilitas nuklir secara sendiri-sendiri.

Daftar fungsi yang telah dilakukan identifikasi dapat dilengkapi lagi dengan fungsi lainnya, misalnya fungsi-fungsi untuk mengurangi frekuensi pemicu pemadaman-cepat (*scram*) dari reaktor dan/atau fitur keselamatan terekayasa (*engineered safety features*) yang diperlukan untuk memulihkan penyimpangan dari kondisi operasi normal (termasuk fitur keselamatan yang dirancang untuk menjaga parameter utama bekerja dalam rentang normal), termasuk fungsi pemantauan. Umumnya fungsi-fungsi tersebut tidak dicantumkan dalam analisis keselamatan.

### Identifikasi Ketetapan Desain

Keselamatan reaktor juga tergantung pada keandalan dari berbagai macam fiturnya. Beberapa fitur dirancang secara khusus digunakan untuk kondisi operasi normal. SSK tersebut dinamakan ketetapan desain. Ketetapan desain tersebut harus diidentifikasi dan dapat dijadikan subjek dari proses klasifikasi keselamatan. Proses pengklasifikasian dengan mutu yang cukup untuk memenuhi perannya akan dilakukan ketika perancangan, manufaktur, konstruksi, pemasangan, komisioning, operasi, pengetesan, inspeksi, dan perawatan.

Ketetapan desain seharusnya mencakup beberapa hal berikut:

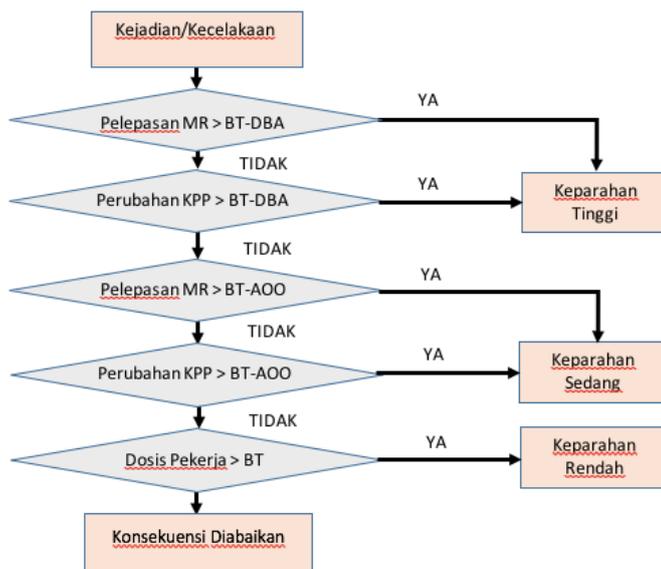
- Fitur desain yang dirancang hingga mutu tertentu sehingga kemungkinan kegagalan-kegagalan secara praktis dapat dihilangkan;
- Fitur yang dirancang untuk mereduksi frekuensi kecelakaan;
- Fitur desain pasif yang dirancang untuk melindungi para pekerja dan masyarakat dari dampak bahaya radiasi pada kondisi operasi normal;
- Fitur desain pasif yang dirancang untuk melindungi komponen yang penting untuk keselamatan dari bahaya kemungkinan kerusakan internal maupun eksternal;
- Fitur yang dirancang untuk mencegah kejadian awal terpostulasi yang dapat berkembang menjadi rentetan peristiwa yang lebih parah tanpa kejadian kegagalan independen lainnya.

SSK yang diterapkan sesuai ketentuan desain seharusnya diklasifikasikan seperti yang direkomendasikan sebagai klasifikasi SSK versi akhir.

*Kategori Fungsi Keselamatan*

Fungsi yang diperlukan untuk memenuhi fungsi keselamatan utama di semua kondisi operasi instalasi, termasuk mode operasi normal, seharusnya dikategorikan berdasarkan tingkat signifikansinya terhadap keselamatan. Tingkat pentingnya pada keselamatan untuk tiap fungsi ditentukan dengan mempertimbangkan faktor-faktor sebagai berikut: Konsekuensi kegagalan untuk menjalankan fungsi; Frekuensi kejadian dari kejadian awal terpostulasi yang mengakibatkan perlunya fungsi tersebut; Signifikansi dari kontribusi fungsi dalam pencapaian kondisi terkendali atau kondisi selamat.

Pendekatan yang direkomendasikan yaitu tingkat keparahan konsekuensi (Faktor 1) dibagi menjadi tiga tingkat keparahan (tinggi, sedang dan rendah) yang didasarkan pada konsekuensi terburuk, diagram dapat di lihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Klasifikasi Keparahannya

Bila lebih dari satu definisi tersebut terpenuhi, maka tingkat tertinggi yang harus diterapkan. Penilaian konsekuensi dilakukan atas dasar asumsi bahwa fungsi tidak menanggapi ketika diperlukan. Faktor 2 yaitu frekuensi kejadian merupakan frekuensi yang menyatakan fungsi akan dipanggil untuk dijalankan. Nilai frekuensi seharusnya dievaluasi terutama berdasarkan pada frekuensi kejadian selaras dengan kejadian awal terpostulasi.

Faktor 3 yaitu signifikansi dari kontribusi fungsi ditekankan untuk mencapai keadaan reaktor tertentu. Kategorisasi fungsi-fungsi yang direkomendasikan meliputi tiga kategori, kategori 1, 2 dan 3 seperti dijelaskan pada Gambar 7 di bawah.

- |   |   |
|---|---|
| 1 | <ul style="list-style-type: none"> <li>Gagal mitigasi AOO/DBA ke keadaan terkendali mengakibatkan keparahan tinggi</li> </ul>   |
| 2 | <ul style="list-style-type: none"> <li>Gagal mitigasi AOO/DBA ke keadaan terkendali mengakibatkan keparahan sedang</li> <li>Gagal mitigasi ke keadaan selamat mengakibatkan keparahan tinggi</li> <li>Fungsi cadangan kategori 1 untuk pencegahan pelelehan teras ketika DEC</li> </ul>   |
| 3 | <ul style="list-style-type: none"> <li>Gagal aktuasi ketika AOO/DBA mengakibatkan keparahan rendah</li> <li>Gagal mitigasi ke keadaan selamat mengakibatkan keparahan sedang</li> <li>Gagal mitigasi DEC mengakibatkan keparahan tinggi</li> <li>Fungsi penurun frekuensi aktuasi trip reaktor, fitur terekayasa untuk operasi abnormal, fitur pengendali operasi normal</li> <li>Fitur pemantau pemberi informasi untuk layanan kedaruratan</li> </ul> |

Gambar 7. Kategori Fungsi [8]

Kategori keselamatan 1: Semua fungsi yang diperlukan untuk mencapai keadaan terkendali setelah kejadian operasi terantisipasi atau kecelakaan dasar desain dan terjadi kegagalan ketika dijalankan sehingga dapat mengakibatkan konsekuensi keparahan tingkat tinggi.

Kategori keselamatan 2: terdiri dari tiga kemungkinan yakni: Suatu fungsi yang diperlukan untuk mencapai kondisi terkendali setelah kejadian operasi terantisipasi atau kecelakaan dasar desain dan terjadi gagal ketika dijalankan, maka dapat mengakibatkan konsekuensi keparahan tingkat sedang; atau Suatu fungsi yang diperlukan untuk mencapai dan menjaga keadaan selamat dalam jangka waktu panjang, dan terjadi kegagalan ketika dijalankan, maka dapat mengakibatkan konsekuensi dengan keparahan yang tinggi; atau Suatu fungsi yang dirancang untuk menyediakan cadangan dari fungsi yang dikategorikan dalam kategori keselamatan 1 dan yang diperlukan untuk mengendalikan kondisi ekstensi desain (*design extension condition*) tanpa terjadinya lelehan teras.

Kategori keselamatan 3: terdiri dari lima kemungkinan yakni: Suatu fungsi yang diaktusasi pada saat terjadi kejadian operasi terantisipasi atau kecelakaan dasar desain, yang jika terjadi kegagalan ketika dijalankan, maka dapat mengakibatkan konsekuensi dengan keparahan rendah; atau Suatu fungsi yang diperlukan untuk mencapai dan mempertahankan kondisi selamat untuk jangka panjang, dan terjadi kegagalan ketika dijalankan, maka dapat mengakibatkan konsekuensi dengan tingkat keparahan sedang; atau Suatu fungsi yang diperlukan untuk mengurangi konsekuensi dari kondisi ekstensi desain, terkecuali telah ditentukan untuk dikategorikan dalam kategori keselamatan 2, dan terjadi kegagalan ketika dijalankan, maka dapat mengakibatkan konsekuensi tingkat keparahan 'tinggi'; atau Suatu fungsi yang didesain untuk mengurangi frekuensi aktuasi dari trip reaktor atau fitur keselamatan terekayasa (*engineered safety features*) dalam kejadian penyimpangan dari kondisi operasi normal, termasuk juga yang didesain untuk mempertahankan parameter utama reaktor berada dalam rentang normal pada operasi instalasi; atau Suatu fungsi yang berkaitan dengan pemantauan untuk memberikan sekumpulan informasi handal secara cukup kepada staf reaktor dan layanan kedaruratan di luar tapak ketika terjadi kecelakaan (kecelakaan dasar desain atau kondisi ekstensi desain) termasuk sarana pemantauan dan komunikasi sebagai bagian dari rencana tindakan kedaruratan (pertahanan berlapis level 5), kecuali jika sudah ditetapkan pada kategori yang lebih tinggi.

Semua kategori dapat dijelaskan dalam Tabel 1. Kategori fungsi dapat dipertimbangkan terdiri dari lebih dari satu kategori (misalnya disebabkan fungsi diperlukan untuk lebih dari satu kejadian awal terpostulasi), maka seharusnya dikategorikan dalam kategori tersebut yang paling tinggi.

Tabel 1. Hubungan Kategori Keselamatan dan Fungsi dalam analisis kejadian Awal Terpostulasi [8]

Fungsi diperlukan dalam penilaian keselamatan	Keparahan dari konsekuensi jika fungsi tidak berjalan		
	Tinggi	Menengah	Rendah
Fungsi untuk mencapai kondisi terkontrol setelah kejadian operasi terantisipasi	Kelas keselamatan 1	Kelas keselamatan 2	Kelas keselamatan 3
Fungsi untuk mencapai kondisi terkontrol setelah kecelakaan dasar desain	Kelas keselamatan 1	Kelas keselamatan 2	Kelas keselamatan 3
Fungsi untuk mencapai dan mempertahankan kondisi selamat	Kelas keselamatan 2	Kelas keselamatan 3	Kelas keselamatan 3
Fungsi untuk mitigasi konsekuensi kondisi ekstensi desain	Kelas keselamatan 2 atau 3	Tidak diklasifikasikan (*)	Tidak diklasifikasikan (*)

Catatan (\*) konsekuensi keparahan rendah atau sedang tidak diharapkan terjadi pada kejadian tidak adanya respons dari fungsi yang didedikasikan untuk mitigasi dari kondisi ekstensi desain.

### *Klasifikasi Struktur, Sistem dan Komponen*

Setelah kategorisasi keselamatan fungsi selesai, SSK yang melakukan fungsi tersebut harus dimasukkan ke dalam kelas keselamatan dan harus diidentifikasi dan diklasifikasikan sesuai dengan tingkat signifikasinya pada keselamatan seperti telah dijelaskan sebelumnya.

Faktor reduksi frekuensi, diterapkan dengan mempertimbangkan sejak kejadian awal terpostulasi sebelum fungsi dijalankan, dapat memperbolehkan SSK dipindah pada kelas lebih rendah sejauh keandalan dapat secara mudah ditunjukkan. Contohnya adalah jeda waktu hingga perbaikan atau perawatan dari SSK, maka kemungkinan menggunakan SSK alternatif dalam jendela waktu yang tersedia untuk menjalankan fungsi keselamatan yang diperlukan.

Jika suatu SSK berkontribusi terhadap unjuk kerja beberapa fungsi dari berbagai kategori keselamatan, maka SSK tersebut harus dimasukkan kepada kelas tertinggi dalam kategori tersebut (misalnya SSK yang membutuhkan peraturan desain teknik yang paling konservatif). Dengan menerapkan berbagai macam pertimbangan relevan (misalnya justifikasi teknis), maka kelas keselamatan akhir dari SSK seharusnya dapat dipilih.

Sesuai yang telah dijelaskan sebelumnya, ketetapan desain dapat diklasifikasi langsung berdasarkan tingkat keparahan dari kegagalannya yakni: Kelas keselamatan 1: Suatu SSK yang jika terjadi kegagalan dapat menyebabkan kecelakaan dengan tingkat keparahan yang tinggi; Kelas keselamatan 2: Suatu SSK yang jika terjadi kegagalan dapat menyebabkan kecelakaan dengan tingkat keparahan yang menengah; Kelas keselamatan 3: Suatu SSK yang jika terjadi kegagalan dapat menyebabkan kecelakaan dengan tingkat keparahan yang rendah.

Suatu SSK (misalnya penghalang api atau banjir) yang kegagalannya dapat mendorong penetapan asumsi dalam analisis potensi bahaya, maka seharusnya dimasukkan paling tidak dalam kelas keselamatan 3.

Suatu SSK yang tidak berkontribusi terhadap kategori keselamatan mana pun tetapi kegagalannya dapat memberikan dampak tak langsung terhadap fungsi kategori tertentu (jika hal tersebut tidak dapat diabaikan dalam desain), maka seharusnya diklasifikasikan secukupnya untuk menghindari dampak yang tidak dapat diterima ketika terjadi kegagalan dari fungsi tersebut.

Ketika SSK yang terkoneksi atau berinteraksi memiliki kelas keselamatan yang tidak sama (termasuk kasus dari SSK pada kelas keselamatan tertentu terhubung pada SSK yang tidak terklasifikasi), maka interferensi antar SSK seharusnya dicegah dengan penggunaan perangkat (misalnya isolator optik atau katup otomatis) yang diklasifikasikan di kelas keselamatan yang lebih tinggi, untuk memastikan tidak akan ada efek dari kegagalan SSK di kelas keselamatan yang lebih rendah atau yang belum terklasifikasi.

Dengan penetapan tiap SSK ke kelas keselamatan, maka sejumlah aturan teknis, desain, dan manufaktur dapat diidentifikasi dan diterapkan pada SSK untuk mencapai kualitas dan keandalan yang sesuai. Rekomendasi mengenai penetapan aturan desain teknis dibahas dalam bagian selanjutnya.

### *Tahap Verifikasi Keselamatan*

Tahap berikutnya adalah dengan melakukan tahap verifikasi keselamatan. Klasifikasi keselamatan yang cukup seharusnya diverifikasi dengan menggunakan analisis keselamatan deterministik, yang seharusnya secara komplementer dengan memperhatikan penilaian keselamatan probabilistik dan/atau didukung pertimbangan teknis (*engineering judgement*).

Kontribusi SSK dalam mereduksi secara keseluruhan risiko reaktor merupakan faktor penting dalam penentuan kelas keselamatan.

Konsistensi antara pendekatan deterministik dan probabilistik akan memberikan kepercayaan bahwa klasifikasi keselamatan tepat. Secara umum diharapkan bahwa kriteria probabilistik dari klasifikasi keselamatan akan cocok dengan hasil dari deterministik.

## KESIMPULAN

Dari kajian di atas dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut: Penentuan klasifikasi SSK memerlukan pemahaman multi-disiplin dan pekerjaan yang sangat membutuhkan sumber daya. Kajian ini ingin memberikan gambaran bagaimana SSK diklasifikasikan menurut pengalaman baik dari negara-negara pemilik dan pembangun reaktor nuklir. Hasil kajian berupa metodologi yang diharapkan dapat menjadi acuan dalam penyusunan PERKA BAPETEN tentang klasifikasi SSK terutama reaktor nuklir. Metodologi atau urutan yang dipaparkan merupakan kumpulan dari negara PLTN sehingga tidak menutup kemungkinan muncul pendekatan yang lebih praktis dan efisien diwaktu yang akan datang. Kajian ini tidak memaparkan ketentuan dari Perka terkait klasifikasi seismik dan mutu sehingga memerlukan pembahasan kajian lebih lanjut.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Kajian ini merupakan kegiatan kajian kerjasama swakelola antara P2STPIBN BAPETEN dan Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika UGM tahun 2017. Penulis mengucapkan terimakasih kepada tim pengkaji BAPETEN dan tim pengkaji DTNTF atas kerjasama yang terjalin begitu juga kerja keras dan efektif hingga terselesaikannya kajian ini.

## DAFTAR PUSTAKA

1. IAEA, *SSG-30 Safety Classification of Structures , Systems and Components in Nuclear Power Plants*. Dokumen Teknis, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2014.
2. Pemerintah Republik Indonesia, PP Nomor 54 Tahun 2012 tentang Keselamatan dan Keamanan ReaktorNuklir. Jakarta, 2012.
3. IAEA NSS nomor SSR-2/1 (Rev. 1) tahun 2016 tentang “Keselamatan Desain PLTN”
4. M. Bernard, “PCSR - Sub-chapter 3.2 - Classification of structures,equipment and systems.” 15-Nov-2012.
5. IAEA, GSR Part 4 (Rev. 1) *Safety Assessment for Facilities and Activities*. Dokumen Teknis, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2016.
6. Perka BAPETEN Nomor 3 Tahun 2011 tentang “Ketentuan Keselamatan Desain Reaktor Daya
7. Perka nomor 10 tahun 2006 tentang “Pedoman Penyusunan Laporan Analisis Keselamatan ReaktorNuklir Non Reaktor”
8. ONR, “ONR Guide; Categorisation of Safety Functions and Classification of Structures, Systems and Components.” Nov-2018.
9. STUK, “Guide YVL 2.1 Nuclear power plant systems, structures and components and their safety classification.” Finnish Centre for Radiation and Nuclear Safety, 26-Jun-2000.

Halaman ini sengaja di kosongkan

# **KELOMPOK E**

---

**SDM, MANAJEMEN DAN INDUSTRI**

Halanan ini sengaja dikosongkan

## KEBUTUHAN SUMBER DAYA PADA EVALUASI TAPAK RDE

Sriyana<sup>1</sup>, Yuliasuti<sup>1</sup>, Heri Syaiful<sup>2</sup> Ewitha Nurulhuda<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Pusat Kajian Sistem Energi Nuklir, Jl. Kuningan Barat, Mampang Prapatan, Jakarta Selatan, 12710

<sup>2</sup> Pusat Teknologi Bahan Galian Nuklir, Pasar Jum'at, Jakarta Selatan

email: [yana@batan.go.id](mailto:yana@batan.go.id)

### ABSTRAK

**KEBUTUHAN SUMBER DAYA PADA EVALUASI TAPAK RDE.** Salah satu infrastruktur yang harus disiapkan pada pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) adalah penyediaan tapaknya. Indonesia telah melakukan studi kelayakan tapak PLTN dan diperoleh tapak yang layak, yakni di Semenanjung Muria, Jawa Tengah dan di Pulau Bangka. Survei awal juga telah dilakukan untuk mendapatkan calon tapak lainnya. BATAN memutuskan untuk membangun reaktor daya non-komersial (RDE, Reaktor Daya Eksperimental) yang menjadi kewenangannya pada tahun 2013. Evaluasi tapak RDE ini dilakukan setelah persetujuan evaluasi tapak diberikan oleh BAPETEN. Survei awal dan evaluasi tapak tersebut dilaksanakan tahun 2014 hingga 2016. Setelah melalui review laporan evaluasi tapak yang melibatkan pakar terkait, izin tapak RDE diterbitkan BAPETEN pada 23 Januari 2017. Penulisan makalah ini bertujuan untuk menyampaikan kebutuhan sumber daya yang diperlukan untuk melaksanakan evaluasi tapak RDE, terutama kebutuhan SDM dan alokasi waktunya. Metode yang digunakan dalam kajian ini adalah perhitungan praktek langsung di lapangan dan dokumen pendukung pelaksanaan kegiatan evaluasi tapak RDE di Kawasan Puspiptek Serpong. Disimpulkan bahwa (1) pelaksanaan evaluasi tapak RDE memerlukan 34 personel (profesional, teknisi dan tenaga administrasi) untuk penyusunan laporan evaluasi tapak dan perbaikan hasil review BAPETEN. (2) Pengumpulan data primer baik oleh konsultan maupun swakelola memerlukan personel sebanyak 70 personel (profesional, teknisi, operator peralatan survei dan tenaga administrasi).

Kata kunci: evaluasi tapak, RDE, kebutuhan sumber daya

### ABSTRACT

**RESOURCES REQUIREMENTS ON THE SITE EVALUATION OF RDE.** One of the infrastructure that must be prepared in the construction of a Nuclear Power Plant (NPP) is the provision of its site. Indonesia has conducted a feasibility study on nuclear power plant sites and obtained a feasible site, namely on the Muria Peninsula, Central Java and on Bangka Island. A preliminary survey has also been carried out to get other prospective sites. BATAN decided to build a non-commercial power reactor (RDE, Experimental Power Reactor) which became its authority in 2013. This RDE site evaluation was carried out after the site evaluation approval was given by BAPETEN. The initial survey and site evaluation was carried out from 2014 to 2016. After going through a review of site evaluation reports involving relevant experts, RDE site permits were issued by BAPETEN on January 23, 2017. The objective of this paper is to convey the resource requirements needed to carry out RDE site evaluations, especially Human Resources needs and time allocation. The method used in this study is to make calculation of direct practice in the field and supporting documents for the implementation of RDE site evaluation activities in the Puspiptek Serpong Area. It was concluded that (1) the implementation of RDE site evaluation requires 34 personnel (professionals, technicians and administrative staff) to prepare site evaluation reports and improve the results of the BAPETEN review. (2) Collection of primary data by consultants and self-management requires as many as 70 personnel (professionals, technicians, survey equipment operators and administrative personnel).

Keywords: site evaluation, RDE, resource requirements

### PENDAHULUAN

Kesiapan suatu negara untuk membangun Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) yang pertama kalinya dapat dilihat dari kesiapan infrastruktur yang diperlukan untuk membangun PLTN. Lembaga atom internasional, IAEA (International Atomic Energy Agency) telah menerbitkan pedoman untuk menilai kesiapan infrastruktur suatu negara.

Penilaian tersebut didasarkan pada 19 aspek, yang salah satunya adalah infrastruktur tapak.<sup>1</sup>

Nuklir sebagai salah satu sumber daya energi telah dipertimbangkan dalam UU No. 17 Tahun 2007 tentang Rencana Pembangunan Jangka Panjang Nasional. Kebijakan Energi Nasional<sup>2</sup> dan Rencana Induk Pengembangan Industri Nasional<sup>3</sup> menyebutkan bahwa nuklir sebagai bagian dari Energi Baru dan Energi Terbarukan perlu dimanfaatkan dalam bauran energi nasional untuk mendukung pembangunan nasional. BATAN selaku institusi yang diberi kewenangan untuk melakukan promosi pemanfaatan ilmu pengetahuan dan teknologi nuklir, khususnya promosi pemanfaatan PLTN di Indonesia, telah melakukan kegiatan terkait dengan penyiapan infrastruktur pembangunannya. Aspek penyiapan tapak PLTN merupakan salah satu infrastruktur penting yang harus disiapkan. Studi tapak telah dilakukan di beberapa wilayah Indonesia untuk mendapatkan calon tapak PLTN tersebut.

Menurut Peraturan Pemerintah No. 2 tahun 2014 tentang Perizinan Instalasi Nuklir dan Pemanfaatan Bahan Nuklir, BATAN sebagai badan pelaksana dapat membangun fasilitas nuklir non-komersial. BATAN pada tahun 2013 merencanakan pembangunan reaktor daya yang bersifat non-komersial dan dinamai dengan Reaktor Daya Eksperimental (RDE). Teknologi yang dipilih adalah teknologi reaktor temperatur tinggi (HTR, high temperature reactor) yang berpendingin gas. Status hingga tahun 2017 adalah memasuki tahap penyelesaian desain dasar (basic design). Sebelum tahapan desain ini, BATAN telah melaksanakan evaluasi tapak RDE ini untuk memperoleh izin tapak dari Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN).

Survei dan evaluasi tapak untuk RDE dilaksanakan lebih kurang selama 2 tahun yaitu dari tahun 2014 sampai 2016. Evaluasi tapak RDE merupakan pengalaman pertama bangsa Indonesia dalam penyampaian permohonan izin tapak pembangunan reaktor nuklir kepada BAPETEN. Pada tanggal 23 Januari 2017 BATAN telah mendapatkan izin tapak RDE tersebut, setelah melalui proses panjang antara lain review beberapa kali oleh BAPETEN yang melibatkan konsultan dalam negeri (ITB, Institut Teknologi Bandung) maupun melibatkan review internasional dari IAEA (Badan Tenaga Atom Internasional).

Evaluasi tapak merupakan tahapan pertama pada tahapan izin pembangunan fasilitas nuklir, termasuk reaktor nuklir. Sebelum melaksanakan evaluasi tapak, sebagai pemenuhan persyaratannya, BATAN menyampaikan dokumen Program Evaluasi Tapak dan dokumen Sistem Manajemen Evaluasi Tapak untuk mendapatkan persetujuan evaluasi tapak dari BAPETEN. Dokumen laporan evaluasi tapak yang terdiri dari 7 aspek (Kegempaan, Kegunungpian, Geoteknik dan pondasi, Meteorologi, Hidrologi, Kejadian Akibat Ulah Manusia dan aspek Dispersi) disampaikan ke BAPETEN untuk direview. Dalam review ini BAPETEN dibantu oleh Tim Ahlinya, yakni dari Institut Teknologi Bandung (ITB). Setelah melalui beberapa review dan perbaikan dokumen ini, BAPETEN mengeluarkan izin tapak RDE.

Setelah mendapatkan izin tapak, tahapan selanjutnya adalah menyampaikan izin konstruksi yang didahului oleh persetujuan desain oleh BAPETEN. Tahapan setelah izin konstruksi diperoleh adalah tahapan izin komisioning yang dilanjutkan dengan tahap akhir perizinan pembangunan, yakni izin operasi.

Tujuan penulisan makalah ini adalah untuk mengidentifikasi sumber daya yang diperlukan (khususnya SDM) pada pelaksanaan evaluasi tapak RDE untuk mendapatkan izin tapak dari BAPETEN.

## **METODOLOGI**

Metodologi yang digunakan adalah melakukan kajian literatur, pengumpulan data, dan diskusi dalam pelaksanaan evaluasi. Acuan literatur yaitu seluruh dokumen evaluasi tapak, peraturan BAPETEN dan kontrak yang dilaksanakan oleh BATAN untuk melaksanakan evaluasi tapak RDE. Sebagian besar data diperoleh dari survei lapangan.

## **EVALUASI TAPAK RDE**

Kegiatan evaluasi tapak RDE dilakukan oleh BATAN mencakup beberapa tahapan. Dalam kegiatan evaluasi tapak dibagi menjadi dua tahap, tahap pertama yang dilaksanakan

<sup>1</sup> IAEA, Milestones in the Development of a National Infrastructure for Nuclear Power, Vienna, 2015

<sup>2</sup> Peraturan Pemerintah No. 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional

<sup>3</sup> Peraturan Pemerintah No. 14 Tahun 2015 tentang Rencana Induk Pengembangan Industri Nasional

pada tahun 2014 dan tahap kedua yang dilaksanakan pada tahun 2015. Aspek yang dievaluasi adalah aspek kegempaan, kegunungpian, geoteknik dan pondasi, meteorologi, hidrologi, kejadian akibat ulah manusia dan aspek dispersi.

Untuk mendapatkan tapak reaktor nuklir yang memberikan jaminan keselamatan bagi pekerja dan masyarakat, maka evaluasi tapak dilakukan mengacu pada peraturan dan persyaratan yang berlaku terkait dengan seluruh aspek yang dievaluasi. Peraturan dan pedoman teknis yang diacu adalah peraturan Kepala BAPETEN.<sup>[4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]</sup>

Kegiatan evaluasi tapak tersebut disamping mengacu pada peraturan dan persyaratan yang berlaku, dalam pelaksanaannya berpedoman pada dokumen yang telah disetujui oleh BAPETEN, yakni dokumen Program Evaluasi Tapak dan Sistem Manajemen Evaluasi Tapak. Data sekunder dan data primer seluruh aspek teknis di atas dikumpulkan melalui studi pustaka dan penelitian di lapangan.

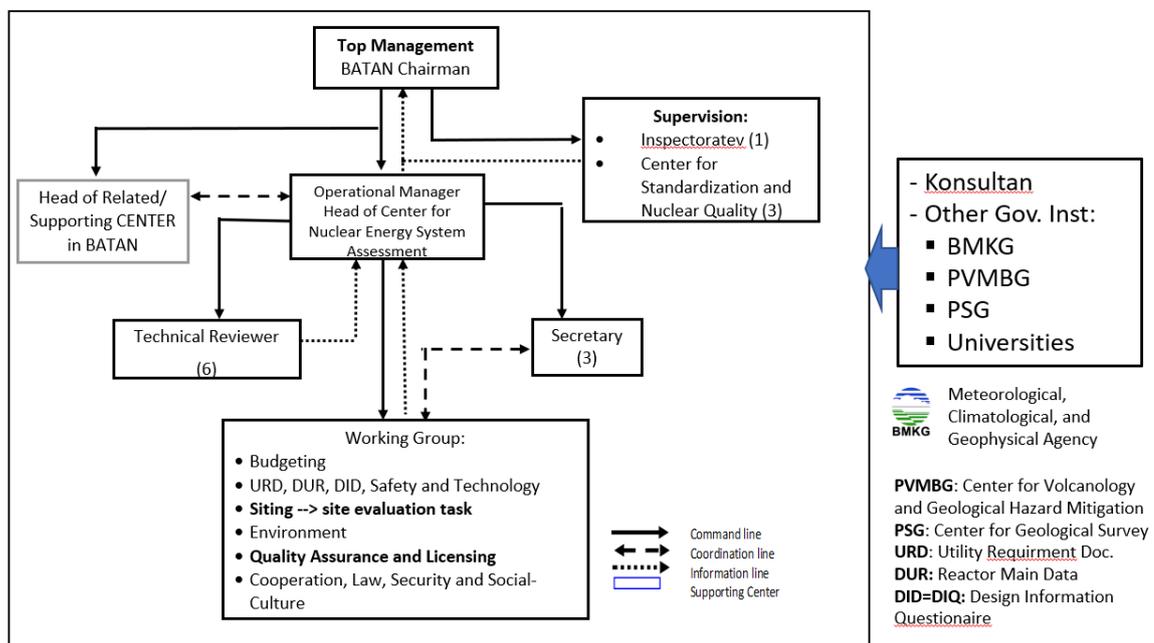
Saat pelaksanaan evaluasi tapak, BAPETEN melakukan verifikasi di lapangan. Seluruh kegiatan per aspeknya dilakukan verifikasi lapangan, disamping verifikasi sistem manajemen pelaksanaannya. Verifikasi teknis per aspek dilaksanakan BAPETEN dibantu tim ahlinya dari ITB, sementara verifikasi sistem manajemen dilaksanakan bersama tim ahli dari Universitas Indonesia (UI).

Laporan evaluasi tapak disusun mengikuti format yang disepakati antara BAPETEN dan BATAN untuk keseluruhan aspek. Laporan ini kemudian disampaikan ke BAPETEN untuk direview dan kemudian diterbitkan izin tapak jika telah disetujui seluruh aspek.

Perhitungan jumlah sumber daya manusia pada evaluasi tapak RDE ini berdasarkan pada keadaan lapangan sebenarnya dan berdasarkan kebutuhan sumber daya manusia yang diperlukan pada saat pelaksanaan.

### STRUKTUR ORGANISASI PELAKSANA EVALUASI TAPAK RDE

Struktur organisasi berikut adalah pelaksana persiapan dan proyek pembangunan RDE secara keseluruhan. Sementara kegiatan evaluasi tapak dilaksanakan oleh kelompok kerja (*working group*) tapak dan kelompok kerja perizinan dan jaminan kualitas. Aluar komando, koordinasi dan informasi digambarkan dalam struktur organisasi di bawah.



Gambar 1. Struktur organisasi pelaksana proyek pembangunan RDE dan Kelompok Kerja Tapak

Pelaksana evaluasi tapak dibantu oleh Konsultan dan Instansi terkait yang berwenang dan memiliki kompetensi terkait, seperti Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG), Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG, Kementerian ESDM), Pusat Studi Geologi (PSG, Kementerian ESDM), dan Perguruan Tinggi (UI, UGM dan ITB).

Salah satu kegiatan evaluasi tapak adalah survei pengukuran gravitasi seperti terlihat pada gambar 2., yang disaksikan oleh BAPETEN dan tim jaminan kualitas BATAN.



Gambar 2. Survei gravitasi disaksikan oleh BAPETEN dan Tim Jaminan Mutu BATAN

### **ALUR KERJA EVALUASI TAPAK RDE DAN KEBUTUHAN SDM**

Kegiatan evaluasi tapak terdiri dari empat tahapan pokok yaitu pengumpulan data, pengolahan data, analisis hasil pengolahan data dan penyiapan dokumen evaluasi tapak. Pengumpulan data dilakukan oleh pihak BATAN dan pihak konsultan. Data yang diperlukan mencakup data primer dan sekunder. Setelah melakukan pengumpulan data, tahapan selanjutnya yaitu pengolahan data yang dilakukan oleh tim BATAN dan dibantu oleh tim ahli dari institusi pemerintah terkait seperti BMKG, PVMBG, PSG dan Perguruan Tinggi. Data hasil pengolahan akan dianalisis oleh tim BATAN dan juga ahli dari institusi pemerintah terkait seperti BMKG, PVMBG, PSG dan Perguruan Tinggi. Penyiapan dokumen untuk persyaratan izin tapak meliputi tujuh aspek meliputi kegempaan, kegunungapian, geoteknik dan pondasi, meteorologi, hidrologi, kejadian akibat ulah manusia serta dispersi dan distribusi penduduk.

#### **Pengumpulan Data Primer oleh Konsultan**

Pengumpulan data primer yang dilakukan oleh pihak konsultan meliputi dua aspek yaitu aspek kegempaan dan kegunungapian dengan radius 5 dan 25 km dari calon tapak. Tenaga konsultan yang dibutuhkan sebanyak 32 orang yang terdiri dari 12 staf profesional, 5 asisten staf profesional dan 15 operator. Pengumpulan data memerlukan waktu selama 5 bulan. Semua data yang dikumpulkan oleh konsultan diolah dan dianalisis oleh SDM BATAN dibantu oleh tenaga ahli dari instansi terkait.

#### **Pengumpulan Data Primer oleh BATAN**

BATAN melakukan pengumpulan data untuk lima aspek yang meliputi aspek geoteknik, meteorologi, hidrologi, kejadian akibat ulah manusia dan dispersi. Data utama dalam aspek geoteknik meliputi pengukuran dan *analysis SVC* membutuhkan waktu 3 hari, *seismic refraction* membutuhkan waktu 8 hari, *GPS geodetic measurement* membutuhkan waktu 15 hari dan *geotechnic boring, sondir test*, dan lainnya membutuhkan waktu 75 hari. Total waktu yang dibutuhkan dalam pengumpulan data aspek geoteknik yaitu selama 2,5 bulan. SDM pelaksana yang dibutuhkan berjumlah 12 personil yang terdiri dari 4 staf profesional, 4 asisten staf profesional dan 4 operator dan surveyor.

Pada aspek meteorologi membutuhkan waktu 2,5 bulan untuk pengolahan data dan analisis. Pelaksanaan dibagi menjadi dua tahap yaitu tahap pertama tahun 2014 dan tahap kedua tahun 2015. Pada tahap pertama kegiatan yang dilakukan meliputi pemantauan data meteorologi, pengumpulan data meteorologi baik dari BMKG maupun dari serpong dan analisis meteorologi ekstrim dan kejadian jarang terjadi. Sedangkan untuk kegiatan pada tahap kedua tahun 2015 meliputi evaluasi bahaya meteorologi dan penentuan parameter dasar desain. Data yang dikumpulkan meliputi data dari stasiun meteorologi yang dimiliki BMKG dan stasiun pada calon tapak RDE yang dimiliki BATAN. SDM yang diperlukan dalam

pengumpulan data aspek meteorologi berjumlah 4 personil yang terdiri dari 1 staf profesional, 2 asisten staf profesional dan 1 operator.

Aspek hidrologi membutuhkan data dari stasiun hidrologi dimana pengambilan datanya dilakukan oleh BATAN dibantu oleh tenaga ahli bidang hidrologi. Pelaksanaan kegiatan pada tahun 2014 mencakup pengumpulan data primer dan sekunder. Pada data sekunder terdapat beberapa parameter yang diperlukan dalam proses pengolahan data diantaranya sejarah banjir dalam 50 tahun terakhir, data meteorologi, data hidrologi, data struktur pengendali air, data pemantauan air tanah dalam kurun waktu 2 tahun dan data geolistrik. Berbeda halnya dengan data sekunder, pengumpulan data primer yang digunakan lebih banyak berasal dari uji laboratorium dan survei lapangan. Selain pemantauan karakteristik hidrolik sungai Cisadane, kegiatan lain yang dilakukan pada tahun ini yaitu evaluasi ketinggian air tanah yang mencakup permodelan hidrogeologi. Kegiatan pada aspek ini membutuhkan waktu selama 6 bulan yang didukung oleh 8 personil yang mencakup 3 staf profesional, 3 asisten staf profesional dan 2 operator.

Selanjutnya aspek kejadian akibat kegiatan manusia melakukan pengumpulan data hingga radius 25 km dari calon tapak RDE. Sebagian besar kegiatan pada aspek ini yaitu melakukan evaluasi dan evaluasi yang dilakukan antara lain evaluasi bahaya lepasan fluida, evaluasi kebakaran, interferensi elektromagnetik dan arus eddy, evaluasi bahaya akibat jatuhnya pesawat, evaluasi bahaya militer dan evaluasi bahaya ledakan. Waktu yang dibutuhkan selama 6 bulan dan didukung oleh 6 orang personil yang mencakup 3 staf profesional, 2 asisten staf profesional dan 1 operator.

Data terakhir yaitu aspek dispersi dan distribusi penduduk yang dikumpulkan dari acuan desain dalam radius 1 km, 5 km, 25 km dan 80 km. Tahap awal pelaksanaan evaluasi tapak aspek dispersi ini yaitu melakukan pengumpulan data yang meliputi data parameter meteorologi, parameter hidrosfir, data tata guna lahan dan air, distribusi penduduk, radioaktivitas lingkungan dan kajian dispersi dan dosis akibat pelepasan zat radioaktif dari reaktor daya kondisi normal. Kemudian untuk tahun selanjutnya melakukan kajian dispersi dan dosis akibat pelepasan zat radioaktif dari reaktor daya kondisi normal dan penyusunan rencana penanggulangan keadaan darurat. SDM yang diperlukan berjumlah 8 orang yang terdiri dari 5 staf profesional, 2 asisten staf profesional dan 1 operator yang membutuhkan waktu selama 7 bulan.



Gambar 3. Kegiatan aspek kegunaan: Refleksi dan Refleksi oleh Konsultan



Gambar 4. Tim Jaminan Mutu menyaksikan saat konsultan melakukan pengeboran geologi

## KESIMPULAN

Pelaksanaan evaluasi tapak RDE memerlukan 34 personel yang mencakup profesional, reknisi dan tenaga administrasi dalam penyusunan laporan evaluasi tapak dan perbaikan hasil review dari BAPETEN. Pengumpulan data primer baik oleh konsultan maupun swakelola memerlukan 70 personel yang mencakup profesional, teknisi, operator peralatan survei dan tenaga administrasi.

## DAFTAR PUSTAKA, ARIAL 10 BOLD

1. IAEA, Milestones in the Development of a National Infrastructure for Nuclear Power, Vienna, 2015.
2. Peraturan Pemerintah No. 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional.
3. Peraturan Pemerintah No. 14 Tahun 2015 tentang Rencana Induk Pengembangan Industri Nasional.
4. Peraturan Kepala BAPETEN No. 1 Tahun 2008 tentang Aspek Kegempaan
5. Peraturan Kepala BAPETEN No. 2 Tahun 2008 tentang Aspek Kegunungpian
6. Peraturan Kepala BAPETEN No. 3 Tahun 2008 tentang Aspek Dispersi dan Distribusi Penduduk
7. Peraturan Kepala BAPETEN No. 4 Tahun 2008 tentang Aspek Geoteknik dan Pondasi
8. Peraturan Kepala BAPETEN No. 5 Tahun 2007 tentang Keselamatan Tapak Reaktor
9. Peraturan Kepala BAPETEN No. 5 Tahun 2008 tentang Aspek Meteorologi
10. Peraturan Kepala BAPETEN No. 6 Tahun 2008 tentang Aspek Kejadian Akibat Ulah Manusia
11. Peraturan Kepala BAPETEN No. 6 Tahun 2014 tentang Aspek Meteorologi dan Hidrologi
12. BATAN, Laporan Evaluasi Tapak RDE Aspek Kegempaan, September 2016.
13. BATAN, Laporan Evaluasi Tapak RDE Aspek Kegunungpian, September 2016.
14. BATAN, Laporan Evaluasi Tapak RDE Aspek Geoteknik dan Pondasi, September 2016.
15. BATAN, Laporan Evaluasi Tapak RDE Aspek Meteorologi, September 2016.
16. BATAN, Laporan Evaluasi Tapak RDE Aspek Hidrologi, September 2016.
17. BATAN, Laporan Evaluasi Tapak RDE Aspek Kejadian Akibat Ulah Manusia, September 2016.
18. BATAN, Laporan Evaluasi Tapak RDE Aspek Dispersi dan Distribusi Penduduk, September 2016

## **ANALISIS KEBIJAKAN PROGRAM MANAJEMEN PENGETAHUAN DALAM MEMENUHI KOMPETENSI SDM NUKLIR**

**Yuri Garini, Harini Wahyuningrum, Oly Desrianti<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Biro Perencanaan, Jl. Kuningan Barat, Mampang Prapatan, Jakarta 12710*  
*email: [garini@batan.go.id](mailto:garini@batan.go.id), [hningrum@batan.go.id](mailto:hningrum@batan.go.id)*

### **ABSTRAK**

**ANALISIS KEBIJAKAN PROGRAM MANAJEMEN PENGETAHUAN DALAM MEMENUHI KOMPETENSI SDM NUKLIR.** Tantangan yang dihadapi oleh organisasi tenaga nuklir di dunia adalah pegawai yang menua dan fakta bahwa generasi yang merancang dan mengoperasikan reaktor sebagian besar telah mencapai usia pensiun. Perampingan dan moratorium pegawai berkontribusi pada masalah ini dan juga menunjukkan berkurangnya tingkat kepercayaan diri pemanfaatan teknologi nuklir untuk energi. Faktor internal organisasi juga turut berperan dalam penurunan atau hilangnya kompetensi SDM karena adanya transfer internal, promosi dan pengunduran diri. Mempertahankan kompetensi nuklir dalam organisasi nuklir adalah salah satu tantangan paling penting bagi Penelitian dan Pengembangan (litbang) teknologi nuklir. Karena banyak pakar nuklir di seluruh dunia mendekati pensiun, dengan kemungkinan bahwa sejumlah besar pengetahuan nuklir penting dan memori organisasi akan hilang. Rumusan masalah penelitian adalah bagaimana rumusan kebijakan manajemen pengetahuan dalam pemenuhan kompetensi SDM nuklir. Tujuan penelitian adalah merumuskan kebijakan manajemen pengetahuan dalam pemenuhan kompetensi SDM nuklir. Hasil rumusan kebijakan tersebut diharapkan dapat digunakan sebagai dasar penyusunan program manajemen pengetahuan BATAN pada periode Rencana Strategis (Renstra) berikutnya. Metodologi pengambilan data penelitian menggunakan sekunder. Metodologi pengolahan data menggunakan analisis deskriptif kualitatif untuk merumuskan kebijakan strategis. Hasil penelitian menunjukkan manajemen perlu mengambil langkah strategis diantaranya menetapkan jumlah publikasi ilmiah kepada pejabat fungsional bidang kompetensi energi dalam rangka preservasi ilmu pengetahuan. Strategi lainnya adalah pengembangan kompetensi melalui diklat, seminar, dan bimbingan teknis, kerjasama penelitian.

Kata kunci: Kompetensi SDM; Kebijakan Strategis; Publikasi Ilmiah

### **ABSTRACT**

**ANALYSIS OF KNOWLEDGE MANAGEMENT POLICY PROGRAM IN MEETING NUCLEAR HR COMPETENCE.** The challenge faced by nuclear power organizations in the world is aging employees and the fact that the generation that designs and operates reactors has largely reached retirement age. Downsizing and moratorium on employees contributed to this problem and also showed a reduced level of confidence in the use of nuclear technology for energy. Internal organizational factors also play a role in the decline or loss of HR competencies due to internal transfers, promotions and resignations. Maintaining nuclear competence in nuclear organizations is one of the most important challenges for nuclear technology Research and Development (R & D). Because many nuclear experts around the world are approaching retirement, with the possibility that a large amount of important nuclear knowledge and organizational memory will be lost. The formulation of the research problem is how to formulate knowledge management policies in meeting nuclear HR competencies. The aim of the research is to formulate knowledge management policies in the fulfillment of nuclear HR competencies. The results of the policy formulation are expected to be used as the basis for the preparation of the BATAN knowledge management program in the next Strategic Planning period. Research data collection methodology uses secondary. Data processing methodology uses qualitative descriptive analysis to formulate strategic policies. The results of the study indicate that management needs to take strategic steps including determining the number of scientific publications to functional officials in the field of energy competency in order to preserve science. Another strategy is developing competencies through training, seminars, and technical guidance, research collaboration.

*Keywords: HR competency; Strategic Policy; Scientific Publication*

## PENDAHULUAN

Tantangan yang dihadapi oleh organisasi tenaga nuklir di dunia adalah pegawai yang menua dan fakta bahwa generasi yang merancang dan mengoperasikan reaktor sebagian besar telah mencapai usia pensiun. Perampingan dan moratorium pegawai berkontribusi pada masalah ini dan juga menunjukkan berkurangnya tingkat kepercayaan diri pemanfaatan teknologi nuklir untuk energi [1]. Faktor internal organisasi juga turut berperan dalam penurunan atau hilangnya kompetensi SDM karena adanya transfer internal, promosi dan pengunduran diri [2]. Mempertahankan kompetensi nuklir dalam organisasi nuklir adalah salah satu tantangan paling penting bagi Penelitian dan Pengembangan (litbang) teknologi nuklir. Karena banyak pakar nuklir di seluruh dunia mendekati pensiun, dengan kemungkinan bahwa sejumlah besar pengetahuan nuklir penting dan memori organisasi akan hilang. Hal tersebut menimbulkan ancaman internal terhadap operasi reaktor yang berkelanjutan dan masa depan fasilitas-fasilitas ini. Penerapan program manajemen pengetahuan (*Knowledge Management/KM*) sangat disarankan untuk menangkap dan mentransfer pengetahuan dari tenaga kerja yang menua kepada para profesional muda. Dalam banyak kasus, KM telah berhasil diimplementasikan untuk tujuan tersebut. Namun, ada aplikasi KM yang lebih luas yang memiliki signifikansi atas seluruh siklus hidup organisasi litbang nuklir.

Manajemen fasilitas nuklir yang efektif membutuhkan personel yang berkualifikasi sesuai. Hal penting dalam manajemen sumber daya manusia adalah manajemen pengetahuan bahwa individu perlu sebagai bagian dari persyaratan kompetensi untuk tugas yang ditugaskan dan pengetahuan tambahan yang mereka peroleh dalam melaksanakan tugas-tugas itu. Pengetahuan tersebut akan dibutuhkan oleh beberapa generasi tenaga kerja selama masa program energi nuklir. Seiring usia tenaga kerja nuklir dan pensiun, jumlah yang sesuai kualifikasi dan berpengalaman staf akan menurun dan pengetahuan yang mereka miliki mungkin hilang. Salah satu upaya yang sedang dilakukan adalah dengan pengembangan program pendidikan tinggi yang fokus pada teknologi nuklir dan aplikasinya. Namun, banyak dari program tersebut masih dalam tataran awal dan bergantung pada dukungan pemerintah [3].

Rumusan masalah penelitian adalah bagaimana rumusan kebijakan manajemen pengetahuan dalam pemenuhan kompetensi SDM nuklir. Tujuan penelitian adalah merumuskan kebijakan manajemen pengetahuan dalam pemenuhan kompetensi SDM nuklir. Hasil rumusan kebijakan tersebut diharapkan dapat digunakan sebagai dasar penyusunan program manajemen pengetahuan BATAN pada periode Renstra berikutnya.

## TEORI/POKOK BAHASAN

Manajemen Pengetahuan didefinisikan sebagai pendekatan sistematis yang terintegrasi untuk mengidentifikasi, memperoleh, mengubah, mengembangkan, menyebarluaskan, menggunakan, berbagi, dan melestarikan pengetahuan, yang relevan untuk mencapai tujuan yang ditentukan. Ini mencakup tiga komponen mendasar: orang, proses dan teknologi. Manajemen pengetahuan berfokus pada orang-orang dan budaya organisasi untuk menstimulasi dan memelihara berbagi dan penggunaan pengetahuan; pada proses atau metode untuk menemukan, membuat, menangkap, dan berbagi pengetahuan; dan teknologi untuk menyimpan dan menjadikan pengetahuan dapat diakses dan memungkinkan orang bekerja sama tanpa bersama. SDM adalah komponen yang paling penting, karena mengelola pengetahuan bergantung pada kesediaan SDM untuk berbagi dan menggunakan kembali pengetahuan [4].

Kompetensi sering digambarkan dalam istilah sederhana sebagai produk pengetahuan, keterampilan, dan sikap. Untuk menjadi kompeten membutuhkan lebih dari sekedar pengetahuan saja dan kualitas ini sangat diinginkan di semua jenis organisasi nuklir. Di beberapa negara, Regulator Nuklir mengharuskan kompetensi staf teknis untuk diukur dan dibenahi sebelum lisensi lokasi dikeluarkan untuk setiap pekerjaan yang melibatkan radiasi nuklir. Kompetensi adalah kemampuan untuk menempatkan keterampilan, pengetahuan, dan sikap dalam praktik untuk melakukan tugas atau peran secara efektif dan efisien dengan standar yang ditetapkan. Kompetensi adalah kombinasi pengetahuan, keterampilan, dan sikap dalam bidang tertentu, yang, ketika diperoleh, memungkinkan seseorang untuk melakukan pekerjaan atau tugas dengan standar yang diidentifikasi. Kompetensi (kompetensi) dapat dikembangkan melalui kombinasi pendidikan, pengalaman dan pelatihan. Pengetahuan mengandung makna apa yang Anda ketahui.

Keterampilan mengandung makna apa yang Anda ketahui cara melakukannya. Sikap mengandung makna apa yang Anda lakukan dan apa yang ingin Anda lakukan. Manajemen kompetensi didasarkan pada tiga elemen utama daftar kompetensi organisasi, penilaian kompetensi, dan pelatihan untuk mempertahankan kompetensi pada tingkat yang diperlukan. Setiap organisasi harus membuat daftar kompetensi organisasinya sesuai dengan persyaratan pekerjaan dan proses organisasi [4]. Persyaratan kompetensi didasarkan pada karakteristik kompetensi pada Tabel 1 berikut sesuai dengan tiga elemen kompetensi utama.

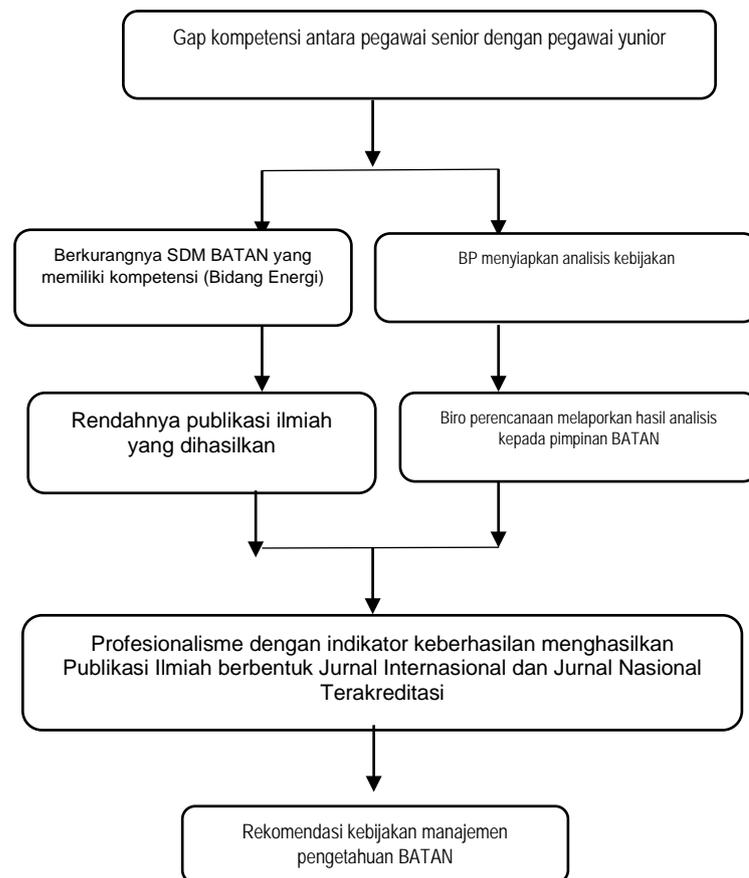
Tabel 1. Kompetensi Utama

No	Kompetensi Utama	Deskripsi
1.	Pengetahuan	<ul style="list-style-type: none"><li>• Pengetahuan - mengenali dan mengingat informasi</li><li>• Pemahaman - menerjemahkan, menerjemahkan atau meringkas informasi yang diberikan</li><li>• Aplikasi - menggunakan informasi dalam situasi yang berbeda dari konteks pembelajaran asli</li><li>• Analisis - membagi keseluruhan menjadi beberapa bagian sampai hubungan menjadi jelas</li><li>• Sintesis - menggabungkan elemen untuk membentuk entitas baru dari yang asli</li><li>• Evaluasi - melibatkan tindakan pengambilan keputusan berdasarkan kriteria atau alasan.</li></ul>
2.	Keterampilan	<ul style="list-style-type: none"><li>• Imitasi - mengamati keterampilan dan mencoba mengulanginya</li><li>• Manipulasi - melakukan keterampilan sesuai dengan instruksi daripada observasi</li><li>• Presisi - mereproduksi keterampilan dengan akurasi, proporsi, dan ketepatan (biasanya dilakukan secara independen dari sumber asli)</li><li>• Artikulasi - menggabungkan satu atau lebih keterampilan secara berurutan dengan harmoni dan konsistensi</li><li>• Naturalisasi - menyelesaikan satu atau lebih keterampilan dengan mudah dan belajar untuk menggunakannya secara otomatis</li></ul>
3.	Sikap (perasaan, persepsi, dan nilai-nilai)	<ul style="list-style-type: none"><li>• Menghadiri - memperhatikan rangsangan atau acara yang diterima</li><li>• Menanggapi - bereaksi positif terhadap rangsangan atau peristiwa melalui antisipasi</li><li>• Menilai - menunjukkan kepercayaan pada nilai atau nilai dari suatu peristiwa atau kegiatan</li><li>• Organisasi nilai - membandingkan berbagai nilai dan memprioritaskan mereka</li><li>• Karakterisasi berdasarkan nilai-nilai - menampilkan karakteristik sikap dari seperangkat nilai yang meresap, konsisten dan dapat diprediksi</li></ul>

Menurut Peraturan Menteri Tenaga Kerja dan Transmigrasi Nomor 21 Tahun 2014 tentang Pedoman Penerapan Kerangka Kualifikasi Nasional Indonesia menyebutkan Kompetensi Kerja adalah kemampuan kerja setiap individu yang mencakup aspek pengetahuan, keterampilan, dan sikap kerja yang sesuai dengan standar yang ditetapkan [5]. Kompetensi yang tinggi bukan hanya menyangkut pengetahuan/pendidikan (*knowledge*) dan keterampilan (*skill*) saja tetapi menyangkut banyak kondisi. Menurut Spencer et al. dalam Yuniarsih (2008), karakteristik kompetensi yang harus dimiliki seseorang agar melakukan pekerjaan dengan baik berdasarkan kriteria yang telah ditentukan, meliputi motif (*motive*), sifat/ciri bawaan (*traits*), konsep diri (*self concept*), pengetahuan (*knowledge*) dan keterampilan (*skill*) [6].

## METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan desain penelitian deskriptif. Penelitian deskriptif bertujuan untuk menggambarkan secara tepat sifat-sifat suatu individu, kelompok tertentu, atau menentukan frekuensi penyebaran suatu gejala, atau frekuensi adanya pengaruh tertentu antara suatu gejala lain dalam masyarakat [7]. Teknik pengumpulan data dan informasi dalam penelitian ini menggunakan data sekunder. Data sekunder diperoleh dari literatur dan dokumen BATAN serta basis data SDM BATAN. Pada penelitian ini, yang menjadi lokus penelitian adalah 5 unit kerja Kedepuitan Teknologi Energi Nuklir (TEN). Periode data yang digunakan adalah tahun 2014 – 2017. Pengolahan data dilakukan dengan menginput data pada aplikasi Microsoft Office Excel kemudian mengolah dan menganalisisnya untuk menjawab tujuan penelitian. Kerangka pemikiran dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:



Gambar 1. Kerangka

Penelitian

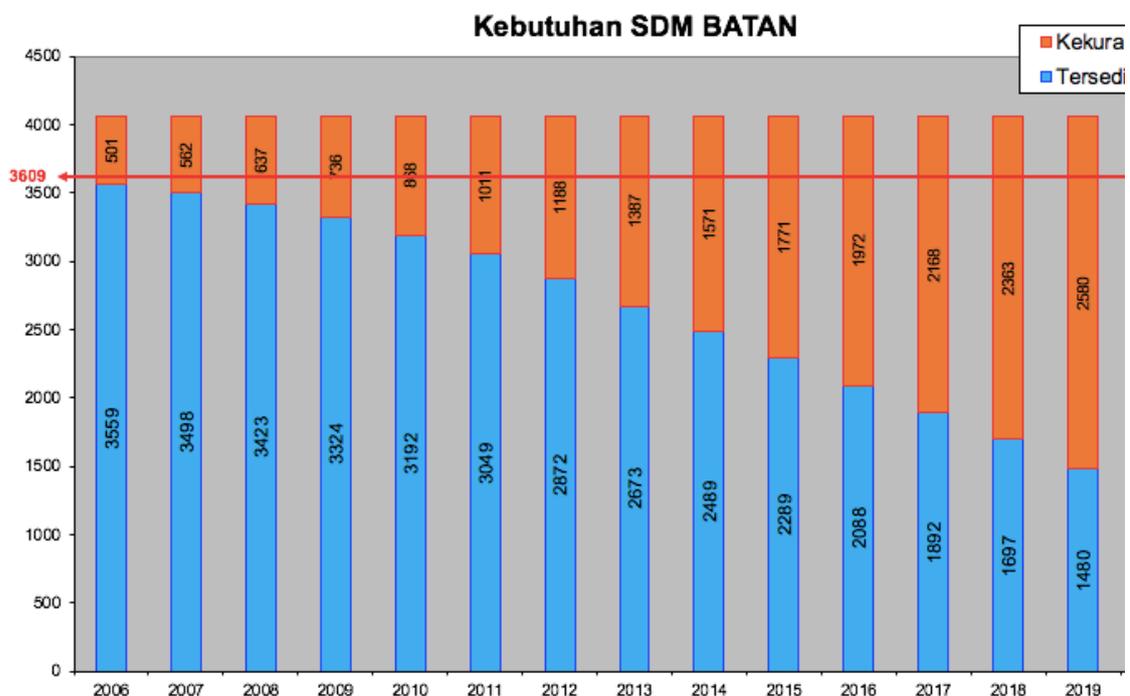
## HASIL DAN PEMBAHASAN

Organisasi litbang nuklir saat ini menghadapi tantangan SDM yang signifikan (misalnya angkatan kerja yang menua, perekrutan pegawai baru dan hilangnya pengetahuan kritis). Perencanaan SDM seperti perencanaan SDM strategis, rekrutmen,

pelatihan dan pengembangan pekerjaan, perencanaan suksesi dan inisiatif retensi, adalah alat untuk memastikan bahwa organisasi mempertahankan pegawai yang berkualitas.

SDM adalah modal utama untuk menggerakkan organisasi. Seperti halnya BATAN saat pembangunan Kawasan Nuklir Serpong tahun 1997 memerlukan pegawai yang sangat besar agar dapat melakukan litbang sesuai Undang-Undang Nomor 10 Tahun 1997 tentang Ketenaganukliran. Berdasarkan Peraturan Kepala Badan Tenaga Nuklir Nasional Nomor 14 Tahun 2013 tentang Organisasi dan Tata Kerja BATAN, sebagaimana telah diubah dengan Peraturan Kepala BATAN Nomor 16 Tahun 2014, Kepala BATAN membawahi tiga Deputi dan Sekretariat Utama. Dalam penelitian yang menjadi lokus adalah Kedeputian Teknologi Energi Nuklir. Dalam perumusan kebijakan program manajemen pengetahuan terkait kompetensi difokuskan pada SDM yang berada dibawah Deputi Bidang Teknologi Energi Nuklir yaitu Pusat Teknologi Bahan Galian Nuklir (PTBGN), Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir (PTBBN), Pusat Teknologi Keselamatan dan Reaktor Nuklir (PTRKN), Pusat Kajian Sistem Energi Nuklir (PKSEN) dan Pusat Teknologi Limbah Radioaktif (PTLR).

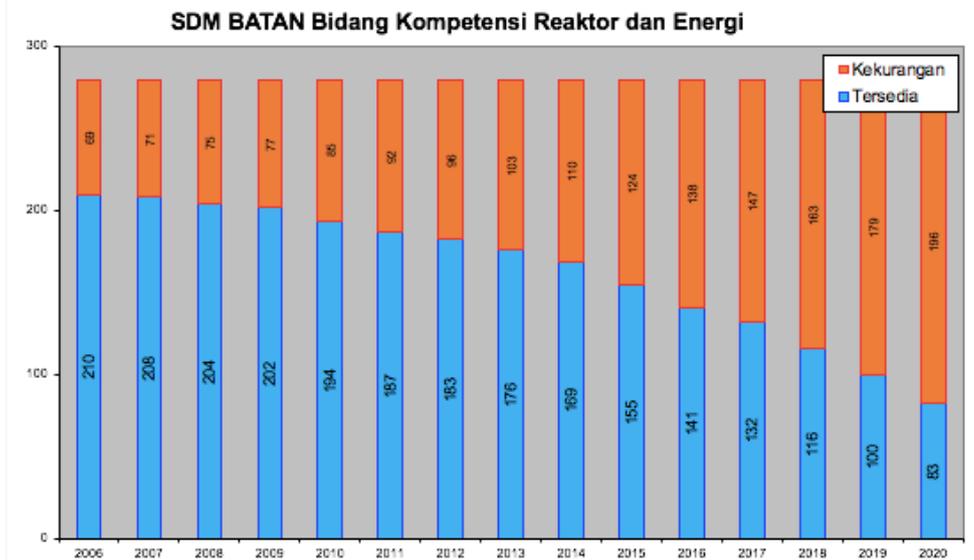
Master Plan SDM BATAN tahun 2006 - 2020 mengatur pembagian SDM menjadi 7 bidang kompetensi yaitu (1). Bidang Kompetensi Isotop dan Radiasi, (2). Bidang Kompetensi Bahan Bakar Nuklir dan Bahan Nuklir, (3). Instalasi dan Instrumentasi Nuklir, (4). Bidang Kompetensi Reaktor dan Energi, (5). Keselamatan Nuklir dan Radiasi, (6) Bidang Kompetensi Penunjang Teknis dan (7). Bidang Kompetensi Penunjang Administrasi. Dengan disahkannya Keputusan Kepala BATAN Nomor 123/KA/III/2018 tentang Kompetensi BATAN, maka adanya perubahan bidang kompetensi yaitu (1). Bidang Kompetensi Isotop dan Radiasi,(2). Daur Bahan Bakar Nuklir dan Bahan Maju, (3). Rekayasa Perangkat dan Fasilitas Nuklir, (4). Reaktor Nuklir, (5).Keselamatan dan Keamanan Nuklir, (6). Manajemen. Pemetaan bidang kompetensi yang baru masih dalam proses penyusunannya, sehingga kompetensi yang digunakan masih menggunakan kompetensi lama.



Gambar 2. Peta Kebutuhan SDM BATAN sampai dengan tahun 2020

Berdasarkan Master Plan BATAN, jumlah SDM yang ideal sebanyak 3.609 orang dengan komposisi SDM teknis sebesar 75% (2.709 orang) dan SDM administrasi sebesar

25% (900 orang). Setiap tahunnya persentase berkurangnya pegawai semakin besar, di tahun 2016 SDM BATAN per 31 Desember 2016 sebanyak 2.602 orang, SDM kompetensi teknis (termasuk SDM Kompetensi penunjang teknis) sebanyak 1.285 orang, sedangkan SDM administrasi sebanyak 1.317 orang. Secara keseluruhan kondisi SDM BATAN yang memiliki kompetensi di tahun 2017 berkurang sebesar 51,64% dari SDM yang ideal, sedangkan pengadaan pegawai tidak menutupi kekurangan SDM tersebut.



Gambar 3. Peta Kebutuhan SDM BATAN Bidang Kompetensi Reaktor dan Energi

Berdasarkan perhitungan dan prediksi masterplan SDM, jumlah SDM BATAN bidang Reaktor dan Energi tahun 2017 adalah 132 orang atau 47,31% dari kebutuhan SDM Optimal (279 orang). Sedangkan data riil jumlah SDM dengan kompetensi bidang Reaktor dan Energi tahun 2017 berjumlah 122 orang sebagaimana dirinci pada Tabel 2.

Tabel 2. Fungsional Peneliti di Deputi Bidang TEN

Unit Kerja	2014	2015	2016	2017
1. PTBGN	2	1	2	3
2. PTBBN	29	30	30	30
3. PTRKN	56	54	56	53
4. PKSEN	25	24	22	22
5. PTLR	15	13	14	14
TOTAL	127	121	124	122

Peran BATAN sebagai lembaga penelitian dan pengembangan (litbang) hasilnya dapat diwujudkan secara ilmiah ke dalam publikasi ilmiah. Salah satu indikator keberhasilan pengembangan kompetensi adalah Karya Tulis Ilmiah (KTI) yang dihasilkan oleh para fungsional peneliti. Karya tulis adalah tulisan hasil litbang dan/atau tinjauan, ulasan (review), kajian, dan pemikiran sistematis yang dituangkan oleh perseorangan atau kelompok yang memenuhi kaidah ilmiah [8]. Terdapat beragam bentuk karya tulis ilmiah (KTI) yang merupakan produk dari lembaga litbang dan lembaga pendidikan. Pada umumnya KTI yang dihasilkan oleh lembaga litbang merupakan sarana publikasi bagi peneliti dan lembaga terkait dalam bentuk buku ilmiah, bunga rampai, majalah ilmiah/jurnal, prosiding, dan lain-lain yang isinya memuat antara lain: makalah lengkap, monografi, komunikasi pendek, kajian kebijakan, dan makalah kebijakan.

Jumlah jurnal di Indonesia dinilai masih kurang bagi masyarakat luas, dalam sebuah skala, satu jurnal digunakan untuk 410 ribu penduduk di tanah air. Sedangkan di Singapura satu jurnal paten digunakan untuk 200 orang. Pada tahun 2014, Indonesia menerbitkan 5.499 jurnal ilmiah pada publikasi-publikasi internasional. Tak hanya kalah dari Singapura, Indonesia kalah dari Singapura (17.198 jurnal) Malaysia (25.330 jurnal) dan Thailand

(12.061 jurnal) [9]. Publikasi ilmiah yang dimuat dalam jurnal internasional dan jurnal nasional terakreditasi di Kedepuitan Bidang TEN dari tahun 2014-2017 masih sekitar 60-80 publikasi. Tabel 3. Menunjukkan jumlah jurnal internasional dan jurnal nasional pada Kedepuitan Bidang TEN.

Tabel 3. Jurnal yang dihasilkan Kedepuitan TEN

Jurnal	2014	2015	2016	2017
1. Jurnal Internasional	26	-	15	12
2. Jurnal Nasional Terakreditasi	56	65	46	46
<b>TOTAL</b>	82	65	61	58

Dalam rentang waktu 2014 – 2015, jumlah publikasi ilmiah pada Kedepuitan TEN yang berskala internasional menunjukkan penurunan demikian pula pada jurnal nasional terakreditasi yang menunjukkan penurunan. Bila dibandingkan dengan jumlah peneliti yang ada pada tabel 2 diatas, maka publikasi yang dihasilkan tidak sebanding dengan jumlah jurnal internasional maupun jurnal nasional terakreditasi.

Untuk meningkatkan kinerja dari para peneliti di Kedepuitan TEN dan semakin menurunnya jumlah peneliti yang memiliki kompetensi di bidang energi dan reaktor maka perlu kebijakan Kepala BATAN untuk meningkatkan publikasi yang berkualitas. Analisis kebijakan diperlukan dalam pemecahan masalah, menurut Dunn analisis kebijakan adalah aktivitas intelektual dan praktis yang ditujukan untuk menciptakan secara kritis menilai, dan mengkomunikasikan pengetahuan [10]. Kebijakan BATAN yang diharapkan adalah melaksanakan program percepatan capaian publikasi ilmiah dimana tiap Peneliti Utama dan S3 wajib untuk mempublikasikan jurnal Internasional dan untuk Peneliti Madya dan S2 untuk mempublikasikan karya ilmiahnya pada jurnal nasional terakreditasi sesuai dengan Surat Edaran Kepala BATAN Nomor 5 tahun 2016. Penerapan terhadap Surat Edaran tersebut harus diimplementasikan oleh semua Unit Kerja di BATAN.

Kondisi yang diharapkan dengan keterbatasan SDM yang memiliki kompetensi adalah profesionalisme untuk dapat menghasilkan publikasi ilmiah yang dipublikasi di jurnal internasional dan jurnal nasional terakreditasi. Selama tahun 2014-2017 yang dihasilkan oleh unit kerja dibawah kedepuitan PTEN menunjukan penurunan baik jurnal internasional maupun jurnal nasional terakreditasi. Salah satu pengembangan karier PNS dilakukan dengan peningkatan kompetensi, menurut Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 11 Tahun 2017 tentang Manajemen Pegawai Negeri Sipil, kompetensi terbagi tiga yaitu kompetensi teknis, kompetensi manajerial dan kompetensi sosial kultural [11]. Dalam kaitannya peningkatan jumlah jurnal berkualitas yang dihasilkan maka diperlukan kompetensi teknis. Kompetensi Teknis adalah pengetahuan, keterampilan, dan sikap/perilaku yang dapat diamati, diukur, dan dikembangkan yang spesifik berkaitan dengan bidang teknis Jabatan. Selain hal tersebut, manajemen perlu mengambil langkah strategis diantaranya menetapkan jumlah publikasi ilmiah kepada pejabat fungsional bidang kompetensi energi dalam rangka preservasi ilmu pengetahuan. Strategi lainnya adalah pengembangan kompetensi melalui diklat, seminar, dan bimbingan teknis, kerjasama penelitian.

## KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian perumusan kebijakan yang dilakukan, diperoleh kesimpulan bahwa kebijakan BATAN yang diharapkan adalah melaksanakan program percepatan capaian publikasi ilmiah dimana tiap Peneliti Utama dan S3 wajib untuk mempublikasikan jurnal Internasional dan untuk Peneliti Madya dan S2 untuk mempublikasikan karya ilmiahnya pada jurnal nasional terakreditasi sesuai dengan Surat Edaran Kepala BATAN Nomor 5 tahun 2016. Unit kerja dibawah Kedepuitan PTEN menunjukan penurunan baik jurnal internasional maupun jurnal nasional terakreditasi. Salah satu pengembangan karier ASN dilakukan dengan peningkatan kompetensi, menurut Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 11 Tahun 2017 tentang Manajemen Pegawai Negeri Sipil. Pimpinan perlu

menetapkan jumlah publikasi ilmiah kepada pejabat fungsional bidang kompetensi energi dalam rangka preservasi ilmu pengetahuan. Strategi lainnya adalah pengembangan kompetensi melalui diklat, seminar, dan bimbingan teknis, kerjasama penelitian

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan terima kasih kepada Kepala Biro Perencanaan Bapak Ir. Ferly Hermana yang telah mengizinkan untuk melakukan kajian ini. Selain itu kami juga mengucapkan terima kasih BSDMO yang telah memberikan data Master Plan SDM BATAN 2006-2020.

#### DAFTAR PUSTAKA

1. IAEA Nuclear Energy Series No. Ng-T-6.10, "Knowledge Management and Its Implementation In Nuclear Organizations", International Atomic Energy Agency Vienna (2016)
2. Risk Management of Knowledge Loss In Nuclear Industry Organizations, International Atomic Energy Agency Vienna (2006)
3. IAEA-Tecdoc-1675, "Knowledge Management For Nuclear Research And Development Organizations, International Atomic Energy Agency", Vienna (2012)
4. IAEA-Tecdoc-1510, "Knowledge Management for Nuclear Industry Operations Organizations", Vienna (2006)
5. Peraturan Menteri Tenaga Kerja dan Transmigrasi Nomor 21 Tahun 2014 tentang Pedoman Penerapan Kerangka Kualifikasi Nasional Indonesia
6. YUNIARSIH S. T, "Manajemen Sumber Daya Manusia, Teori, Aplikasi dan Isu Penelitian", Penerbit Alfabeta Bandung (2008)
7. Indriantoro S, "Metodologi Penelitian Bisnis Untuk Akuntansi dan Manajemen" Edisi Pertama: BPFE Yogyakarta (1999)
8. Master Plan SDM BATAN Tahun 2006-2020, [www.batan.go.id/ref\\_utama/master\\_plan\\_sdm\\_batan\\_2020.ppt](http://www.batan.go.id/ref_utama/master_plan_sdm_batan_2020.ppt)
9. "Muramnya Wajah Dunia Riset Indonesia", <https://primakara.ac.id/perbedaan-jurnal-internasional-jurnal-nasional-dan-jurnal-lokal-menurut-pak-2014>
10. Nugroho R, "Public Policy", PT Elex Media Komputindo, Jakarta, 2012.
11. Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 11 Tahun 2017 tentang Manajemen Pegawai Negeri Sipil

## **RESILIENCE ENGINEERING, MANAGEMENT SYSTEM AND LEADERSHIP SPECTRUM APPROACH FOR THE HIGH-RISK ORGANISATION**

**I Wayan Ngarayana<sup>1,2</sup>, Jepri Sutanto<sup>2</sup>, Suzie Darmawati<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Department of Nuclear System Safety Engineering, Nagaoka University of Technology, 1603-1 Kamitomioka-machi, Nagaoka 940-2188, Japan*

<sup>2</sup>*Center for Nuclear Standardization and Quality, National Nuclear Energy Agency of Indonesia, Tangerang Selatan, Indonesia 15314*

\*E-mail: [ananda052010@gmail.com](mailto:ananda052010@gmail.com) ; [ngarayana@batan.go.id](mailto:ngarayana@batan.go.id); [sdarmawati@batan.go.id](mailto:sdarmawati@batan.go.id)

### **ABSTRACT**

**RESILIENCE ENGINEERING, MANAGEMENT SYSTEM AND LEADERSHIP SPECTRUM APPROACH FOR THE HIGH-RISK ORGANISATION.** Each system runs with the aim of achieving organisational objectives through the management system. However, even though it has been anticipated in various ways through various kinds of safety engineering approaches, incidents and even severe accidents are still possible to be happen. Management systems with their derivative documents like standard operating procedures are prepared to keep the system operating under normal conditions. However, such management system tools are sometimes cannot be applied in an emergency condition which requires a beyond ordinary action. That action is becoming the scope of resilience engineering in the effort to restore the system into normal conditions and/or to avoid more severe accidents. This article explaining the concepts of resilience engineering, how this concept should be applied together with the management system through the spectrum leadership approach as an effort to anticipate events that possibly can lead to severe accidents. This study shows that the resilience engineering, system management and spectrum leadership are very close correlated and have to be owned by all levels of personnel in the high-risk installation organization.

**Keywords:** resilience engineering, management system, accident, high-risk installation, leadership

### **ABSTRAK**

**REKAYASA KETAHANAN, SISTEM MANAJEMEN DAN PENDEKATAN SPEKTRUM KEPEMIMPINAN UNTUK ORGANISASI RISIKO TINGGI.** Setiap sistem berjalan dengan sasaran mencapai tujuan organisasi melalui sistem manajemen. Namun, meskipun telah diantisipasi dalam berbagai cara melalui berbagai macam pendekatan rekayasa keselamatan, insidens dan bahkan kecelakaan berat masih mungkin terjadi. Sistem manajemen dengan dokumen turunannya seperti SOP disiapkan untuk menjaga sistem tetap beroperasi dalam kondisi normal. Namun, alat sistem manajemen terkadang tidak dapat diterapkan dalam kondisi darurat yang membutuhkan tindakan di luar kebiasaan. Tindakan itu menjadi ruang lingkup rekayasa ketahanan dalam upaya mengembalikan sistem ke kondisi normal dan/atau untuk menghindari kecelakaan yang lebih parah. Artikel ini menjelaskan konsep rekayasa ketahanan, bagaimana konsep ini harus diterapkan bersama dengan sistem manajemen melalui pendekatan spektrum kepemimpinan sebagai upaya untuk mengantisipasi peristiwa yang mungkin dapat menyebabkan kecelakaan berat. Studi ini menunjukkan bahwa rekayasa ketahanan, manajemen sistem dan kepemimpinan spektrum sangat erat berkorelasi dan harus dimiliki oleh semua tingkat personel dalam organisasi instalasi berisiko tinggi.

**Kata kunci:** rekayasa ketahanan, sistem manajemen, kecelakaan, instalasi berisiko tinggi, kepemimpinan

## INTRODUCTION

The term of resilience is originally derived from the Latin word *resiliere* which means jump back that is commonly used to say that something is bound back from crisis. The use of the resilience term in engineering is also not new, old articles such as those written by Correia et al in 1985, also had used the resilience term to mention a measure of recovery time of the system [1]. However, at that time the use of the term resilience as an integrated part of engineering was still very limited. Furthermore, the first publication using the term resilience engineering has been written in 2003. However, resilience engineering became widely used by the academic community from the first Resilience Engineering Symposium that was held in Sweden in 2004 [2]. The American Society of Mechanical Engineering defines resilience engineering as the knowledge of the ability of a system to control internal and external disruptions with the aim of continuing its operation [3]. Woods and Hollnagel define resilience engineering as a paradigm that focuses on how to help people with complexity under pressure to achieve success [4]. While Resilience Engineering Association defines it as the ways to enhance the ability at all levels of organizations to create processes that are robust yet flexible, to monitor and revise risk models, and to use resources proactively in the face of disruptions or ongoing production and economic pressures. So with the simple word, resilience engineering can be interpreted as the way how to manage a system so that it has the ability to face the extreme changes and return back to normal conditions. Resilience engineering implementation to restore the system condition actually involves very complex conditions that not only include technical aspects but also organisational, human behaviour, leadership and various other aspects. The process becomes more complex especially in relation to nuclear safety that is not only limited to regional and/or national interests, but also into the international spotlight.

Beside 2011 Tohoku earthquake that triggered Fukushima Nuclear Power Plant (NPP) severe accident, there are valuable lessons learned and good practices in the application of resilience engineering that may not be widely known to the public [5]. When the earthquake and tsunami occurred, there were at least 10 NPPs that experienced the greatest impact, namely Fukushima Daiichi units 1-6 and Fukushima Daini units 1-4. When the accident occurred, some of the personnel involved had attempted in all limitations to control the reactor to avoid more severe accidents. The problems faced were not only related to the limited technical support to shut down the NPPs safely, but also very complex socio-technical problems. The earthquake and tsunami have caused the entire electricity network in the affected area broken but also destroyed the communication and transportation networks. Efforts to deal with station blackout are very difficult due to logistical access problems including parts, equipment and life support facility for the workers such as food and sanitary. On the other hand, the workers also could not contact their relatives who were also affected by the disaster. So that in these conditions one can imagine how difficult and stressful conditions faced by the personnel involved in that disaster management. In such limitations, although 4 units of NPP affected experienced the severe accident, the other units can be saved. A number of valuable lessons learned as part of the engineering concepts can be also used as lessons learned.

Although all the emergency diesel generators in Fukushima Daini did not function as well as the entire seawater pump except in unit 3 which was still functioning partially, fortunately, the external power supply was available so that the cooling process mechanism can be carried out more easily. Unfortunately, that situation did not happen at the Fukushima Daiichi which experienced total station blackout due to the broken of the external and internal power supply. All of the diesel generators except in unit 6 was submergence and there was also a limitation with the Direct Current (DC) power availability from the battery. As part of the emergency response, one of the efforts that had been done was by collecting the car batteries from the nearest shops or from the staff's vehicles. Heroic efforts to cooling down the reactor by using mobile firefighting also had been done due to unavailability of emergency core cooling systems. Unfortunately, these efforts were not able to prevent Fukushima Daiichi units 1, 2 and 3 from core meltdown which was also followed by the explosion due to hydrogen gas accumulation on units 1, 3 and 4. Detail chronological accidents and efforts that had been happened in Fukushima NPP can be read such as reported by TEPCO [6] and also some other third parties article.

The hydrogen explosions that occurred on unit 1, 3 and 4 and by lessons learned from unit 2 that avoided from explosion due to a hole in their containment building that formed during the explosion of unit 1, manager of unit 5 and 6 made a rescue effort by punching

holes in reactor building [5]. That effort was made in the hope that if hydrogen gas is formed due to core overheating, then the accumulation of hydrogen gas that able to trigger an explosion will not occur. Nevertheless by making a hole in the containment building, it means destroying one of the barriers in the concept of NPP defence in depth. Of course, there is no standard, code or maybe regulation that justifies the act of intentionally destroying the radiation barrier. On the other hand by lessons learned from unit 1-4 conditions that effort is indicated the possibility of radioactive release reduction into the environment if core meltdown occurred.

What had been done in the heroic efforts of the overcoming effects of the earthquake and tsunami on Fukushima Daiichi NPP is one of the real example application of resilience engineering. On that condition, we can see how the traditional safety management cannot be used and have to change with resilience engineering by doing any possible efforts to bounce back the system into the normal condition. In that situation, we also can observe the importance of leadership at all of the organisation level and how they have to change their leadership style. Those phenomena are needed to be studied as a part of lessons learned for the future. On the rest of this article, Section 2 will be started with the explanation of the basic concept of resilience engineering, management system and the leadership. Section 3 we would like to discuss the correlation between them and how leadership spectrum has to change depending on the situation. Finally, on Section 4, this article will be closed by the conclusion.

## **1. Resilience engineering, management system and leadership**

### **1.1. Resilience engineering**

The main objective of resilience engineering is how to make a system that is resilient, in the sense that it has characteristics that are elastic, solid and still in control so that they are able to be operated and/or recovered in relation to the objectives of the organization. The scope of the spectrum of resilience engineering is very broad ranging from a narrow scope to large organisation. Resilience engineering also can be applied not only to engineering installation but also to the ecological, social, biological conservation, etc. Generally, resilience engineering has four cornerstones that become the basic foundation, namely learning, responding, monitoring and anticipating [7]. Learning is a process that relates to how a system can take lessons learned from an event in the form of success and failure stories and make them as the lessons learned for continuous improvement. Yoshizawa et al, argue that the learning process of a system varies greatly due to the influence of causal factors, such as mental & physical health and working environment, technical and non-technical skills and attitude [5]. All of the causal factors from the learning process will ultimately have an effect on the responding aspects. The response given to a disturbance as an effort to return back the system to its current state must be followed by monitoring. Through monitoring, responding effects can be observed in preparing aspect anticipating as a form of preparation if a disruption to the system occurs again in the future.

In correlation with the application of RE at the time of Fukushima Accident, learning aspects were carried out based on the lessons learned from the hydrogen explosion on units 1, 3 and 4 but did not occur in unit 2 due to the creation of holes in the containment. Whereas unit 2 also experienced a core meltdown which certainly also produced a number of hydrogen gases as well as units 1 and 3. Although it was not based on perfect evidence, the management decided to take a quick response by drilling on containment building units 5 and 6 as responding aspect. As a form of anticipating similar events in the future, monitoring of drilling actions and the phenomena that occur in units 1-3 are very valuable not only for TEPCO but also the world nuclear industry.

In a wider scope, the application of resilience engineering can be observed in traditional community environments such as in Indonesia. Some parts of Indonesia are traversed by active faults stretching from the tip of the islands of Sumatra, Java, Bali, Lombok, Nusa Tenggara and towards the Philippines through the Maluku islands. As a result, the areas that the active fault passes through becoming areas that are quite vulnerable to earthquake. Some large earthquakes struck Indonesia in the past, such as what happened in Bali in 1815, 1917 and 1979. In this long span of time, the Indonesian people developed building structures that were relatively resistant to earthquakes. From the results of observations on the condition of the building due to the 2018 Lombok earthquake, there is evidence that almost all of Lombok's traditional buildings are still standing firmly when other modern buildings have been severely damaged. Similar building structures that are also resistant to earthquakes are also

found in almost all traditional building structures in fault areas in Indonesia [8]. This shows that traditional communities have applied the principles of resilience engineering through a long evolution with the application of four cornerstones, learning, responding, monitoring and anticipating.

As a new field, resilience engineering is growing up very fast. Many research and development to make this field more mature are needed, such as regarding its connection with the other theory regarding its complexity behaviour, the correlation with safety management tools [2][9]. Because of that, it is widely possible if the resilience concept that been discussed in this article maybe will quickly become obsolete

## 2.2. Management system

Base on the Oxford Dictionary, the meaning of management is the process of dealing with or controlling things or people [10]. International Standard Organisation (ISO) that is very famous with their management system standards and followed by many organisations around the world defines management as coordinated activities to direct and control an organisation [11]. Therefore, the management system can be defined as the system that used to state the process of dealing with, or controlling things, people or organisation.

There are many kinds of the management system that have been well developed and published as a standard, such as quality management system, risk management system, security management system, information technology management system, asset management system, energy management system, etc. To achieve its objectives, an organisation has to implement a good management system that is generally based on several of the above standards. The more complex of an organization is, usually will also be followed by more management systems implementation. The implementation of many management systems like that triggers the development of an integrated management system. Management systems can be integrated because basically the whole management system has the same basic concept, which is based on a management cycle Plan-Do-Check-Act (PDCA) [12]. Planning is related to how to develop strategy, tactics and such kind of plan to archive organisational goals and objectives. After planning has been arranged, and then has to be implemented on the Do stage. To ensure that all implementation in Do stage runs according to Plan, then the Check stage has to be done through various tools. If an incompatibility is found, then have to be followed by corrective action on the Act stage. Furthermore, this cycle have to be repeated as an effort to achieve continual improvement.

Although resilience engineering and organisational problems are not only limited to safety and accident problems, the discussion in this article is more related to safety. Therefore, this article discusses the general management system concept and with a little bit closer to the management system that closes correlated with safety will be used.

Continual improvement of the management system is relatively abstract. Safety is not like a product quality that can be observed and rated easily. The ultimate goal of safety management is how to ensure every activity in an organisation will not pose with higher safety limit condition or if possible to archive zero accident [13]. Safety with the unification of risk and consequence need a unique handling [14]. In the Plan stage, safety should be identified through the level of risk and their consequence, make the classification, establishing safety objective by based on safety identification. Because the goal of safety management is to avoid accidents, reduce risk probability and reduce the consequences, the method used is not similar to the method to improve the product quality. Do stage on management system should be done by following the training, consultancy and communication, documents control and records, operational control, emergency preparedness and response. And then Check and Act stages are similar to another management system that has to be done by using monitoring, audit, assessment and management review processes.

Resilience engineering at first glance has similarities with the concept of the management cycle, P-D-C-A. However, these two concepts have very different implementation areas. The management cycle is a process in the continual improvement of an organisation in normal conditions starting with the activity planning process in an effort to achieve the goals and objectives of the organisation, implementing activities in accordance with planning, checking the implementation of activities through audit activities, assessment, and inspection followed by action improvements are based on finding checking to determine the next better plan. While cornerstones of resilience engineering is a learning step that must be done from deviations beyond normal conditions as described above.

### 2.3 Leadership

Leadership has long been recognized as a factor that is very influential in achieving the success of an organizational system. In *The Art of War* by Sun Tzu, which is a mandatory reading of military officers around the world, is said that strategic leadership will be the determinant of the effectiveness of troops in a battle [15]. As a strategic concept that is very legendary and considered universally applicable, the principles of *The Art of War* have also been adopted in various fields and levels of the organisation.

The strategic role of leadership in determining the success of the organization in achieving its objectives has also led to the inclusion of leadership clauses in IAEA Safety Fundamental 1 (SF-1), General Safety Requirement part 2 (GSR-2) and ISO 9001 Management System standards. ISO defines leadership as the person or group of people who directs and controls an organization at the highest level [11]. Because of their responsibility regarding their position, so actually, every person should have leadership characters in accordance with its level to ensure the process in an organization runs optimally.

There are many leadership theories that are brought forward by experts in the world. From those theories, there are eight main general theories widely quoted. The eight leadership theories include the great man theory, trait theory, contingency theory, situational theory, behaviour theory, participative theory, management theory, and relationship theory [16]. Each theory is based on their paradigm and point of view of their respective thinking so that basically their existence is complimentary. From all the leadership theories mentioned above, in this article leadership will be approached with situational theory. Situational theories propose that leaders choose the best course of action based upon situational variables. This theory is then closely related to the leadership style which has a great influence on the leadership effectiveness.

Leadership style relates to the way shown by someone in their efforts to influence and give the perception to others, especially those who are staff, so it is not based on what is perceived by themselves. The leadership style will influence the response of their subordinates to the orders and direction of the leader, both in the form of motivation, enthusiasm, a better work ethic, initialization, cooperation, etc. or vice versa towards negative. The biggest difficulty in leadership is located in the difference of the personal characters who are led. The bigger scope of the organization will increase the heterogeneous work environment, and as the impact will also increase the leadership difficulties. Therefore, there is an argument which states that the ability of leaders to change their leadership style according to the situation and condition of the organisation and its personnel will greatly influence the success of the leader.

A Leader is not similar to a manager [17]. The managerial position has a strong correlation with the organisational structure, but leadership is not always related to the position. A manager should have leadership skills, but a leader does not need become a manager. Everyone should have leadership skills according to his or her own responsibility. If a manager usually focuses about think, do things right, doing planning, organize, direct, control and follow the rule, then a leader has characteristic to focus on people, do the right things, inspire, influence, motivate, build and shape entities.

Military leadership is the most ancient leadership style that known by mankind. Military leadership style is identical with commando system, rigid, authoritarian, and changing individual character become more identic with doctrinarian. On the opposite side, there is a civil leadership style that has quite contras characteristics. Civil leadership style is identic with democratic, flexibility, relatively free to argue and make an expression. The military leadership style is well known to be very suitable for emergency situations that are not only for war but in the conditions of disaster that require quick action in the effort to carry out search and rescue activities. Such quick action will be more difficult if carried out with the civilian leadership style which is more dominated by consensus that tends to require a relatively long time. However, the rigid character of military leadership does not provide enough room for creativity. So for this purpose, civil leadership style will become superior. Going back to the situational leadership theory above, to be able to provide optimal results, a leader must be able to change his leadership style following a range of spectrum between military and civilian leadership style.

## 2. Leadership spectrum changing, resilience engineering and management system implementation

The increase of the system complexity is also pushing the development of safety. Safety philosophy has been developing by the time from safety I, safety II and now resilience engineering had been established [18]. Safety I is correlated with the question “what goes wrong?”. Through this question, to run the system function properly, the search for malfunction becomes the main focus. With the increasing of malfunction that can be found and corrected, it is expected that the safety level also will increase. Realizing that the safety factor is not only sourced from the technical aspect but also not free from human error, environmental conditions and increasingly complex system interactions, safety paradigm then change becomes Safety II. Safety II is correlated with the question “what goes right?”. In that sense, the achievement of safety does not only focus on malfunction but also learns from success based on observing the phenomena that occur in repeated activities every day so the lessons learned and best practice can be reused. The increase of socio-technical complexity and with the increase of sophisticated system make the safety problems become more complicated. This condition makes the Safety II approach insufficient to be used as a basis for problem-solving. That is why resilience engineering is being developed. Resilience engineering deals with how to build a solid system that has high adaptability to facing interference. The illustration of the difference between Safety I, Safety II and Resilience Engineering is illustrated as shown in Figure 1 which was adopted with modifications from Martinetti et al.

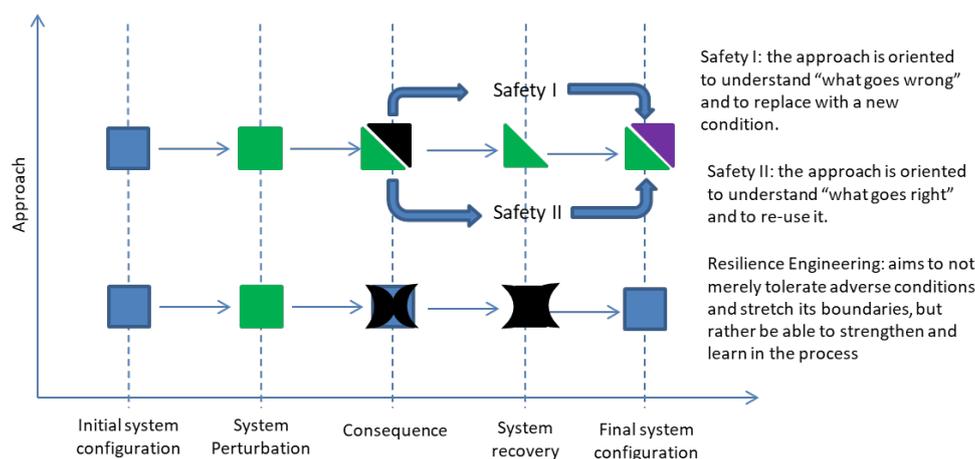


Figure 1 – Safety I, Safety II and Resilience Engineering [18].

Safety management is built based on the Safety I and Safety II paradigm. Because of that continual improvement of management system process that is based on PDCA cycle usually will be done based on the questions “what did wrong?” and “what does right?” that is conducted during Check and Act stage. The effectiveness of the achievement of safety management objective can be pushed by safety culture implementation. But the next problem is there are many reciprocal factors that compose safety culture and some time each component has a very complicated correlation.

IAEA defines safety culture as an assembly of characteristics and attitudes in organisations and individuals which establishes that, as an overriding priority, protection and safety issues receive the attention warranted by their significance [19]. Base on Traits of Healthy Nuclear Safety Culture by World Association of Nuclear Operators (WANO), safety culture is constructed by three components; individual commitment to safety, management commitment to safety, and management system [20]. Individual commitment to safety is constructed by some elements such as personal accountability, questioning attitude, safety communication, etc. Management commitment to safety is composed by leadership accountability, decision making, respectful work environment, etc. In addition management system has some sub-component such as continuous learning, problem identification and solution, environment for raising concerns, work processes, etc. To build a strong safety culture, all of these components should be improved since as illustrated Dominic Cooper Reciprocal Safety Culture Model, person, behaviour and situation as the part of individual,

organisation and managerial is linked each other [21]. Furthermore, Dominic Cooper also explained safety culture is like the skin of onion that constructed layer by layer. The outer layer is the artefact that can be observed directly by using direct sense such as the condition of equipment, work environment, the dress code of the worker, etc. Inner of that is espoused value, something that cannot be sensed directly but can be felt, such as how they facing an accident, how to put safety as top priority, etc. Moreover in the core is the basic assumption that constructed as unconscious level. The basic assumption is very hard to be assessed and or changed, but actually, like the structure of the atom, the basic assumption is central for safety culture development. Without good basic assumption construction, changing on the espoused value and artefact will not sustain although we can change it relatively quickly and easily.

IAEA publication INSAG-15 that actually also have been adapted from Dominic Cooper theory describing three stages to build safety culture [22]. The first stage is establishing a good role and regulation. By pushing good role for all individual and including managerial will force everyone to do the right think on the right place to archive safety objective. On this stage, worker maybe just follow the rule because they do not want to get any sanction and not because of already aware that safety is important for their self, organisation and environment. The impact of this stage will directly induce the artefact layer and slowly will be followed and become a habit. After that, the second stage is based on purposes. That means good safety performance become an organisation goal and is dealt with primarily in term of safety targets or goals. This means on this stage individual and organisation already aware and making safety as a need and make it as a part of organisation management commitment. After safety become an inseparable part of the organisation, the last stage is based on the improvement by using management system principle.

The next question is whether after an organization that has a management system and is supported by a safety culture is formed, it is sufficient to face the possibility of a rare accident commonly referred to as black swan and white raven phenomenon? This is the important role of resilience engineering in anticipating unexpected possibilities so that the rescue actions to returns back the system and/or organisation back to its current state. Figure 2 is intended to give illustration the elaboration of thoughts in which the role of the management system, resilience engineering stand in and how the leadership style spectrum must be changed.

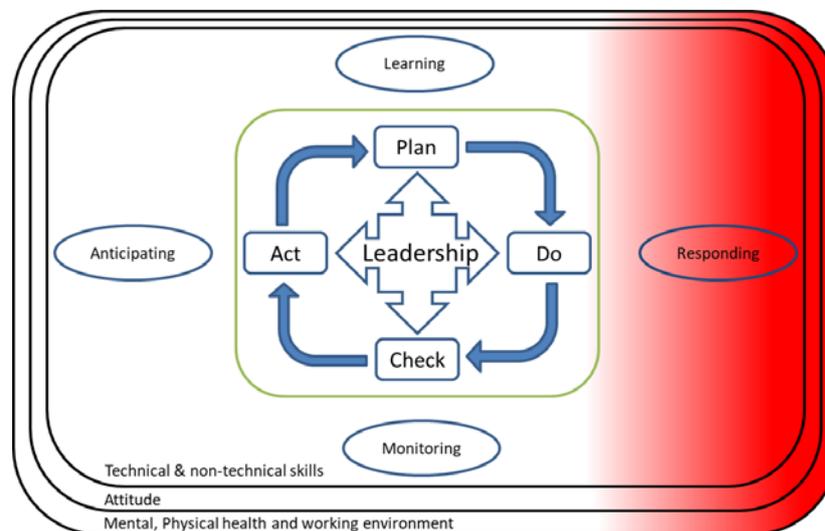


Figure 2 – Illustration of resilience engineering, management system and leadership spectrum changing.

Under normal conditions, the organisation has to run continual improvement of the management system and safety culture in a sustainable manner. Nevertheless on an ongoing basis, an organization also has to develop resilience engineering cornerstones which include

monitoring, anticipating and learning. Those cornerstones do not always have to be based on direct experience of the organisation, but can also be based on events that were based on the outside of the organisation. The learning outcomes are a very important factor in preparing responding, although the probability is very small, and it is even expected that it will never happen.

In running the management system, building safety culture also building cornerstones of resilience engineering, leadership has a very central role. In the organization, leadership must be owned by every person. But of course, the leadership characteristic of each person will vary depending on their duties, obligations and authority in the organizational structure. Under normal conditions, the suitable style is civil leadership style, since this style will provide more flexibility for creativity that enables the organization development to become more optimal. But in the case of accident condition and the responding cornerstone in the concept of resilience engineering have to be carried out then the leadership style has to be changed to the military leadership style considering this style will able to act quickly. But of course, the change in the leadership style spectrum is not as simple as that illustrated. The change in leadership style is very dynamic which depends not only on the conditions faced by the organization, but also influenced by interpersonal relationships. Leadership style spectrum changing will also become more complex if in an activity that is both normal and in handling accidents involving other organizations. For example, if there is a nuclear emergency that needs help handling from the army, firefighter, the local and national government also international organizations. There are several studies that study the interaction between multi-team leadership styles like this such as have been done by DeChurch et al [23]. However we still cannot find study regarding multi-team in the relation with resilience engineering.

Building a good concept regarding management systems in relation to resilience engineering and changing the spectrum of leadership styles also implementing them is not easy. Therefore, this must be built through an individual, system and management approach as a whole.

## CONCLUSION

Resilience engineering, management system, leadership and other causal factors are closely related to the success of an organisation in achieving its objectives and facing beyond normal conditions. Under normal conditions, the organisation must implement a management system through their continual improvement concept. But in conditions of beyond normal conditions that lead to a severe accident, the organisation must be able to implement the concepts of resilience engineering. Both management systems and resilience engineering must be built sustainably and supported by their causal factors. The development and implementation of management systems and resilience engineering both require good leadership skills. However, every person in the organisation in accordance with the level of responsibility is also required to have the ability to change the leadership spectrum according to the conditions and challenges that must be faced in the field. Therefore, understanding of resilience engineering, management system leadership and their causal factors must be owned by the organisation and applied well by each person at each level.

## ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank the BATAN for the infrastructure. The authors also wish to acknowledge the Center for Nuclear Standardization and Quality and Department of Nuclear System Safety Engineering, Nagaoka University of Technology,

## REFERENCES

- [1] F. N. Correia, M. A. Santos, and R. R. Rodrigues, "Risk, Resilience and Vulnerability in Regional Drought Studies," *IFAC Proc. Vol.*, vol. 18, no. 14, pp. 139–144, 1985.
- [2] A. W. Righi, T. A. Saurin, and P. Wachs, *A systematic literature review of resilience engineering: Research areas and a research agenda proposal*, vol. 141. Elsevier, 2015.
- [3] N. Yodo and P. Wang, "Engineering Resilience Quantification and System Design

- Implications: A Literature Survey,” *J. Mech. Des.*, 2016.
- [4] E. Hollnagel, D. D. Woods, and N. Leveson, *Resilience engineering: Concepts and precepts*. 2012.
- [5] A. Yoshizawa, K. Oba, and M. Kitamura, “Lessons Learned from Good Practices During the Accident at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station in Light of Resilience Engineering,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 19, pp. 245–250, 2016.
- [6] TEPCO, IAEA, TEPCO, and Japan Nuclear Emergency Response Headquarters, “Fukushima Nuclear Accidents Investigation Report Attachment Summary of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Main gate Unit 6 Unit 5 Unit 1 Unit 2 Unit 3,” 2012.
- [7] E. Hollnagel, “The scope of resilience engineering,” *Resil. Eng. Pract. A Guideb.*, 2011.
- [8] L. B. and P. P., “Learning from Local Wisdom: Friction Damper in Traditional Building,” *Civ. Eng. Dimens.*, 2012.
- [9] R. Patriarca, J. Bergström, G. Di Gravio, and F. Costantino, “Resilience engineering: Current status of the research and future challenges,” *Saf. Sci.*, vol. 102, no. October 2017, pp. 79–100, 2018.
- [10] O. E. D. Online, “Oxford English Dictionary Online,” *Oxford English Dict.*, 2010.
- [11] K. Teeluckdharry, “ISO 9000: Quality Systems Handbook,” *Biomed. Instrum. Technol.*, 2008.
- [12] A. Labodová, “Implementing integrated management systems using a risk analysis based approach,” in *Journal of Cleaner Production*, 2004.
- [13] A. Kumar, V. Srividya, A. Durga, and R. Karanki, *Reliability and Safety Engineering: Second Edition*, Second Edi. Hoang Pham, Piscataway, USA, 2016.
- [14] T. Kontogiannis, M. C. Leva, and N. Balfe, “Total Safety Management: Principles, processes and methods,” *Saf. Sci.*, 2017.
- [15] C. Shapiro and H. R. Varian, “The Art of Standards Wars.,” *Calif. Manage. Rev.*, 1999.
- [16] R. Maloş, “The Most Important Leadership Theories,” *Ann. Eftimie Murgu Univ. Resita, Fascicle II, Econ. Stud.*, 2012.
- [17] M. Kumar Sharma and M. Shilpa Jain, “Leadership Management: Principles, Models and Theories,” *Glob. J. Manag. Bus. Stud.*, 2013.
- [18] A. Martinetti, M. M. Chatzimichailidou, L. Maida, and L. van Dongen, “Safety I–II, resilience and antifragility engineering: a debate explained through an accident occurring on a mobile elevating work platform,” *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, vol. 3548, pp. 1–10, 2018.
- [19] Y. G. Kim, S. M. Lee, and P. H. Seong, “A methodology for a quantitative assessment of safety culture in NPPs based on Bayesian networks,” *Ann. Nucl. Energy*, vol. 102, pp. 23–36, 2017.
- [20] W. Principles, “WANO PRINCIPLES PL | 2013-1 May 2013,” no. May, 2013.
- [21] M. D. Cooper Ph.D., “Towards a model of safety culture,” *Saf. Sci.*, 2000.
- [22] International Nuclear Safety Advisory Group, “Key practical issues in strengthening safety culture,” vol. INSAG-15, p. 32, 2002.
- [23] L. A. DeChurch, C. S. Burke, M. L. Shuffler, R. Lyons, D. Doty, and E. Salas, “A

historiometric analysis of leadership in mission critical multiteam environments,”  
*Leadersh. Q.*, vol. 22, no. 1, pp. 152–169, 2011.

## PENILAIAN TINGKAT RISIKO PADA PROYEK PLTN

**Imam Bastori, Edwaren Liun**  
*Pusat Kajian Sistem Energi Nuklir-Batan*  
*Email : imbast@batan.go.id*

### ABSTRAK

**PENILAIAN TINGKAT RISIKO PADA PROYEK PLTN.** Proyek PLTN adalah bisnis penuh dinamika, risiko dan tantangan. Penerapan manajemen risiko menjadi suatu kewajiban yang harus dijalankan dalam mengelola proyek PLTN yang sangat kompleks dan besar ini. Secara umum manajemen risiko pada suatu proyek meliputi langkah memahami dan mengidentifikasi masalah potensial yang mungkin terjadi, mengevaluasi, memantau dan menangani risiko. Tujuan manajemen risiko yang utama adalah mencegah atau meminimalisasi pengaruh yang tidak baik akibat kejadian yang tidak terduga melalui penghindaran risiko atau persiapan rencana kontingensi yang berkaitan dengan risiko tersebut. Makalah ini memaparkan identifikasi faktor-faktor, penilaian dan mitigasi risiko menggunakan Matriks Boston. Hasil analisis menunjukkan bahwa banyak coba-coba, gagal dalam mendefinisikan struktur pekerjaan, jadwal proyek yang tidak realistis, perubahan desain dan pekerjaan, perubahan lingkup, perubahan pemerintahan dan komitmen merupakan faktor-faktor dengan risiko sangat tinggi.

Kata kunci : faktor risiko, Matriks Boston, penilaian risiko, PLTN

### ABSTRACT

**RISK RATING AT NUCLEAR POWER PLANT PROJECTS.** The NPP project is a business full of dynamics, risks and challenges. The implementation of risk management becomes an obligation that must be executed in managing this very complex and large nuclear project. In general, risk management in a project includes steps to understand and identify potential problems that may occur, evaluate, monitor and handle risks. The main risk management objectives are to prevent or minimize adverse effects due to unforeseen events through risk aversion or preparation of contingency plans related to those risks. This paper describes the identification of risk factors, assessments and mitigation using the Boston Matrix. The results of the analysis show that many experiments, failing in defining job structure, unrealistic project schedules, design and work changes, scope change, governance change and commitment are factors with very high risk.

Key words : risk factors, Boston Matrix, risk rating, NPP

### PENDAHULUAN

Sesuai dengan pandangan Hayes (1986) risiko dan ketidakpastian adalah bagian dari keseluruhan pekerjaan proyek [1]. Faktor-faktor lain yang membawa risiko termasuk : kompleksitas pekerjaan, kecepatan konstruksi, lokasi proyek, dan familiaritas terhadap pekerjaan. Ketika suatu risiko serius terjadi pada proyek, pengaruhnya dapat sangat merusak. Dalam hal-hal yang ekstrim, waktu dan biaya meningkat secara drastis, membalikan kondisi suatu proyek yang berpotensi untung menjadi proyek yang merugi. Hayes merekomendasikan bahwa cukup berguna untuk mengelompokkan risiko sesuai dengan ukuran kesederhanaannya dalam hal probabilitas dan dampaknya, dengan memfokuskan pada apa yang penting dan tindakan mana yang dapat mengontrol risiko. Godfrey dan Hayes menemukan bahwa derajat ketidakpastian yang paling besar ditemukan lebih awal pada suatu proyek baru [1]. Keputusan yang diambil selama tahap awal dari suatu proyek dapat memiliki pengaruh yang sangat besar pada durasi dan biaya akhir proyek. Pada fase awal, perubahan adalah suatu faktor yang tidak dapat dihindarkan dari proyek dengan kapital besar, masalahnya luasnya perubahan sering di bawah estimasi.

Dalam tahap inisiasi suatu proyek, risiko proyek sudah harus diidentifikasi secara jelas dalam bentuk faktor-faktor risiko, dilakukan penilaian risiko dan cara meminimalkan risiko. Dengan demikian maka proyek siap dijalankan dengan tingkat kepercayaan yang tinggi dan yang lebih penting lagi proses manajemen risiko proyek menjadi lebih mudah dan terarah.

## MANAJEMEN RISIKO

Setiap proyek pasti memiliki risiko, hal ini terjadi karena adanya ketidakpastian. Risiko dan proyek diibaratkan seperti dua hal yang melekat karena risiko tidak dapat dipisahkan dari proyek. Risiko terdiri dari dua kelompok utama yaitu probabilitas dan dampak[3]. Kedua komponen tersebut yang menyebabkan risiko tidak dapat didefinisikan secara pasti. Besar kecilnya suatu risiko bergantung dari hasil perkalian kedua faktor tersebut.

Manajemen risiko pada proyek meliputi langkah memahami dan mengidentifikasi masalah potensial yang mungkin terjadi, mengevaluasi, memonitoring dan menangani risiko [7]. Secara umum, tujuan manajemen risiko yang utama adalah mencegah atau meminimalisasi pengaruh yang tidak baik akibat kejadian yang tidak terduga melalui penghindaran risiko atau persiapan rencana kontingensi yang berkaitan dengan risiko tersebut. Proses manajemen risiko memberikan gambaran kepada kita bahwa untuk mengelola risiko ada beberapa tahapan yakni:

### a) Perencanaan Manajemen Risiko

Perencanaan mencakup langkah memutuskan bagaimana mendekati dan merencanakan aktivitas manajemen risiko pada sebuah proyek. Didasarkan pada pertimbangan lingkup proyek, rencana manajemen proyek, dan faktor lingkungan perusahaan/institusi, tim proyek dapat mendiskusikan dan menganalisis aktivitas manajemen risiko untuk suatu proyek[1,7]. Untuk membuat perencanaan manajemen risiko, ada beberapa hal yang dibutuhkan:

- 1) Piagam Proyek (*Project Charter*)  
yakni dokumen yang dikeluarkan oleh manajemen puncak yang secara formal menyatakan adanya suatu proyek. Dokumen ini memberi otorisasi kepada manajer proyek untuk menggunakan sumberdaya organisasi dalam melaksanakan aktivitas proyek.
- 2) Kebijakan manajemen risiko,
- 3) Susunan peran dan tanggung jawab dalam organisasi proyek,
- 4) Toleransi *stakeholder* terhadap risiko,
- 5) *Template* untuk rencana manajemen risiko organisasi ,
- 6) Struktur pekerjaan proyek (*Work Breakdown Structure*, WBS)

Keluaran dari perencanaan manajemen risiko adalah Rencana Manajemen Risiko yang terdiri dari:

- 1) Metodologi yang menguraikan definisi alat, pendekatan, sumber data yang mungkin digunakan dalam manajemen risiko proyek.
- 2) Peran dan Tanggung Jawab yang memaparkan tanggung jawab dan peran utama serta pendukung berikut keanggotaan tim manajemen risiko untuk setiap tindakan.
- 3) *Budget* yang berisi rencana anggaran untuk manajemen risiko proyek.
- 4) Waktu yang berisi rencana waktu pelaksanaan proses manajemen risiko sepanjang siklus proyek.
- 5) *Scoring* dan Interpretasi yang menguraikan metode skoring dan interpretasi yang sesuai tipe dan waktu analisis risiko kualitatif maupun kuantitatif.

### b) Identifikasi Risiko

Sebagai suatu rangkaian proses, identifikasi risiko dimulai dengan memahami apa sebenarnya yang disebut sebagai risiko. Berikutnya adalah pendefinisian risiko yang mungkin mempengaruhi tingkat keberhasilan proyek dan mendokumentasikan karakteristik dari tiap-tiap risiko. Identifikasi risiko bisa dilakukan dengan membuat analisis sumber risiko dan masalah. Analisis sumber risiko yaitu analisis risiko dengan melihat dari mana risiko berasal. Untuk dapat mengidentifikasi risiko setidaknya ada empat metode yang biasa digunakan:

- 1) Identifikasi risiko berdasarkan tujuan, yaitu risiko diidentifikasi berdasarkan sejauh mana suatu peristiwa dapat membahayakan pencapaian tujuan secara perbagian atau secara keseluruhan pekerjaan proyek.
- 2) Identifikasi risiko berdasarkan skenario, yaitu risiko diidentifikasi berdasarkan skenario yang dibuat berdasarkan perkiraan terjadinya sebuah peristiwa.

- 3) Identifikasi risiko berdasarkan taksonomi, yaitu risiko diuraikan berdasarkan sumber risiko dengan menggunakan pengetahuan praktik yang ada melalui daftar pertanyaan yang telah disusun yang jawabannya akan menunjukkan risiko yang ada.
- 4) *Common risk check*, yaitu risiko yang sudah biasa terjadi, didaftar dan dilakukan pemilihan mana risiko yang sesuai dengan proyek yang sedang dikerjakan.

Beberapa teknik yang dapat membantu dalam melakukan identifikasi risiko, antara lain: *Round Table Discussion*, *Delphi Technique*, *Interviewing*, *Root Cause Identification*, dan *Strength, Weakness, Opportunities, and Threats (SWOT) analysis* [2,4,16,19]

*Round Table Discussion* adalah suatu *brainstorming* yang dilakukan dengan cara mengundang beberapa orang proyek dan dikumpulkan dalam suatu ruangan untuk berbagi ide tentang risiko proyek. Ide tentang risiko proyek dihasilkan dengan bantuan seorang fasilitator. *Delphi technique* adalah cara mencapai konsensus dari para ahli. Para ahli dalam bidang risiko proyek berpartisipasi tanpa nama atau *anonymously*, dan difasilitasi dengan suatu kuisioner untuk mendapatkan ide tentang risiko proyek yang dominan. Respon yang ada diringkas, kemudian disirkulasi ulang kepada para ahli untuk komentar lebih lanjut. Konsensus mungkin dicapai didalam berapa kali putaran proses. *Delphi technique* sangat membantu untuk mengurangi bias pada data dan menjaga untuk tidak dipengaruhi oleh pendapat yang tidak semestinya pada keluaran (*outcome*). *Interview* adalah teknik untuk mengumpulkan data tentang risiko proyek. *Interview* dilakukan terhadap anggota tim proyek dan stakeholder lainnya yang telah berpengalaman dalam risiko proyek. *Root Cause Identification* digunakan untuk mengetahui penyebab risiko yang esensial dan yang akan mempertajam definisi risiko yang selanjutnya dibuat kedalam grup berdasarkan penyebab. SWOT analysis merupakan teknik yang didasari dari perspektif SWOT untuk meningkatkan pemahaman risiko yang lebih luas.

### c) Analisis Risiko Kualitatif

Analisis kualitatif dalam manajemen risiko adalah proses menilai dampak dan kemungkinan risiko yang sudah diidentifikasi. Proses ini dilakukan dengan menyusun risiko berdasarkan dampaknya terhadap tujuan proyek. Analisis ini merupakan cara prioritasasi risiko sehingga membentuk gambaran risiko yang harus mendapat perhatian khusus dan cara merespon risiko tersebut seandainya terjadi.

Analisis risiko kualitatif juga dapat dilakukan dengan matriks 5x5 yang disebut Matriks Segi Empat Boston (*Boston Square Matrix*). Metode ini berguna untuk memvisualisasikan risiko dalam bentuk matriks prioritas risiko yang dominan. Risiko-risiko yang telah teridentifikasi dikategorikan ke dalam risiko tinggi, sedang, dan rendah yang secara berurutan diwakili dengan warna merah, kuning, dan hijau [16,17,18]. Risiko-risiko ini diperingkatkan berdasarkan probabilitas dan dampaknya. Contoh matriks segi empat Boston dapat dilihat pada gambar 1 berikut.

Faktor Probabilitas	Hampir pasti terjadi	5	10	15	20	25
	Sering terjadi	4	8	12	16	20
	Mungkin terjadi	3	6	9	12	15
	Jarang terjadi	2	4	6	8	10
	Hampir tidak terjadi	1	2	3	4	5
		Sangat Kecil	Kecil	Sedang	Besar	Sangat Besar
Faktor Dampak						

Legenda:

13-25	Risiko tinggi
6-12	Risiko sedang
1-5	Risiko rendah

**Gambar 1. Matriks Segi Empat Boston (*Boston Square Matrix*) [10, 17]**

**Tabel 1. Skor probabilitas dan dampak**

Skor	Probabilitas	Dampak
1	Hampir tidak terjadi	Sangat kecil
2	Jarang terjadi	Kecil
3	Mungkin terjadi	Sedang
4	Sering terjadi	Besar
5	Hampir pasti terjadi	Sangat besar

### METODOLOGI

Langkah pertama dengan mengumpulkan data risiko yang sudah biasa terjadi pada aktivitas proyek PLTN, bersumber dari Badan Tenaga Atom Internasional (IAEA), *World Nuclear Association (WNA)*, dan sumber lain di internet, cara ini biasa disebut *common risk check*. Langkah berikutnya menyusun tabel penilaian probabilitas risiko dan tabel penilaian dampak risiko. Kedua tabel ini diisi dengan memberikan *scoring* 1 – 5 pada tiap kolom tabel yang sudah dibuat dengan metoda *expert judgement*. Pengertian score 1 – 5 dapat dilihat pada tabel 1. Langkah ketiga, membuat *spreadsheet* penilaian risiko dan memasukan semua data probabilitas dan dampak risiko pada *spreadsheet* tersebut untuk mendapatkan nilai probabilitas dan dampak risiko. *Spreadsheet* akan mengalikan secara otomatis nilai probabilitas dengan nilai dampak untuk menghasilkan nilai risiko. Nilai risiko yang dihasilkan akan diberikan kriteria dengan menggunakan matriks segi empat Boston. Warna hijau untuk nilai risiko 1 – 5 menunjukkan risiko rendah, warna kuning untuk nilai risiko 6 – 12 menunjukkan risiko sedang dan warna merah untuk nilai risiko 13 – 25 menunjukkan risiko tinggi.

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil identifikasi faktor-faktor risiko yang sering terjadi dalam pelaksanaan proyek PLTN oleh Badan Tenaga Atom Internasional (IAEA), dikelompokkan dalam 9 faktor utama sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.

**Tabel 2. Faktor-faktor penyebab kegagalan proyek PLTN**

No.	Faktor Utama	Akar Masalah
1	Perencanaan	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tujuan, sasaran dan persyaratan proyek tidak didefinisikan secara jelas dari awal</li> <li>Perencanaan dilakukan dengan data yang tidak mencukupi</li> <li>Banyak coba-coba</li> <li>Gagal untuk mendefinisikan WBS (<i>Work Breakdown Structure</i>)</li> <li>Gagal dalam menentukan deadline dan milestone</li> <li>Skedul proyek tidak realistis</li> <li>Gagal dalam menganalisis hambatan dan risiko</li> <li>Alokasi sumber daya tidak mencukupi</li> </ul>
2	Perubahan	<ul style="list-style-type: none"> <li>Peningkatan biaya dan modifikasi jadwal : biaya melaksanakan proyek berubah secara eksponensial terhadap waktu, banyak perubahan di akhir proyek dapat membunuh proyek</li> <li>Perubahan desain/pekerjaan</li> <li>Perubahan lingkup proyek</li> <li>Perubahan pemerintahan dan kurangnya komitmen dari penguasa</li> </ul>
3	Penjadwalan ( <i>Scheduling</i> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kerangka waktu yang disediakan untuk menyelesaikan proyek terlalu pendek</li> <li>Terlalu optimis dengan tenggat waktu proyek</li> </ul>
4	Dukungan Manajemen	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kurangnya dukungan dan keterlibatan dari manajemen puncak</li> <li>Kekurangan peralatan dan ketrampilan khusus</li> </ul>
5	Pendanaan ( <i>Funding</i> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>Menghentikan dana selama proyek berlangsung</li> <li><i>Kiss of death to the project</i> (Biaya dan waktu meluncur tak</li> </ul>

No.	Faktor Utama	Akar Masalah
		terkendali)
6	Sumber daya	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sumber daya manusia yang tidak memadai menyebabkan proyek bergerak lambat dan sangat menguras tenaga</li> <li>• Investasi awal pendidikan dari investor dan pabrikan rendah</li> </ul>
7	Komunikasi	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gagal mengkomunikasikan sasaran, status dsb.</li> <li>• Gagal mendengarkan <i>stakeholder</i></li> </ul>
8	Manajemen <i>stakeholder</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mengabaikan <i>stakeholder</i> (pemangku kepentingan)</li> <li>• Tidak memperhatikan kebutuhan dan ekspektasi <i>stakeholder</i></li> </ul>
9	Eksekusi proyek	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tidak memasukan perencanaan yang baik</li> <li>• Miskin dalam penggunaan sumber daya</li> <li>• Kurang kontrol dan koordinasi</li> <li>• Gagal dalam menyelesaikan permasalahan dan konflik secara cepat</li> <li>• Miskin kerjasama dalam pelaksanaan proyek</li> </ul>

Faktor-faktor risiko seperti pada Tabel 2 dilakukan penilaian dari sisi probabilitas terjadinya risiko dengan pendekatan *expert judgement*, hasil penilaian ini ditampilkan pada Tabel 3. Dengan cara yang sama dilakukan juga penilaian risiko dari sisi dampak yang ditimbulkan oleh faktor-faktor tersebut, hasil penilaian ini dipaparkan dalam Tabel 4. Tahap akhir dari proses ini adalah mengalikan nilai probabilitas dan dampak pada masing-masing faktor risiko untuk mendapatkan nilai total dari risiko, hasil ini disajikan dalam Tabel 4.

**Tabel 3. Penilaian komponen faktor risiko**

NO.	FAKTOR RISIKO	Probabilitas	Dampak
	<b>Perencanaan</b>		
1	Tujuan, sasaran dan persyaratan proyek tidak didefinisikan secara jelas dari awal	3.00	3.00
2	Perencanaan dilakukan dengan data yang tidak mencukupi	2.88	4.00
3	Banyak coba-coba dalam proyek	4.00	4.25
4	Gagal untuk mendefinisikan WBS ( <i>Work Breakdown Structure</i> )	3.67	3.80
5	Gagal dalam menentukan deadline dan milestone	3.80	4.00
6	Skedul proyek tidak realistis	4.00	3.60
7	Gagal dalam menganalisis hambatan dan risiko	4.00	3.80
8	Alokasi sumber daya tidak mencukupi	3.88	3.60
	<b>Perubahan</b>		
9	Peningkatan biaya dan modifikasi jadwal pada proyek	4.33	3.88
10	Perubahan desain	4.00	3.75
11	Perubahan lingkup proyek	4.13	4.00
12	Perubahan pemerintahan dan kurangnya komitmen dari penguasa	4.00	4.00
	<b>Penjadwalan</b>		
13	Kerangka waktu yang disediakan untuk menyelesaikan proyek terlalu pendek	3.00	4.00
14	Terlalu optimis dengan tenggat waktu proyek	3.00	4.00
	<b>Dukungan Manajemen</b>		
15	Kurangnya dukungan dan keterlibatan dari manajemen puncak	4.00	4.00
16	Kekurangan peralatan dan ketrampilan khusus	3.00	3.80
	<b>Pendanaan</b>		

NO.	FAKTOR RISIKO	Probabilitas	Dampak
17	Menghentikan dana selama proyek berlangsung	3.00	4.00
18	<i>Kiss of death to the project</i> (Biaya dan waktu meluncur tak terkendali)	3.00	4.00
	<b>Sumber daya</b>		
19	Sumber daya manusia yang tidak memadai menyebabkan proyek bergerak lambat	3.00	4.00
20	Investasi awal pendidikan dari investor dan pabrikan rendah	3.00	4.00
	<b>Komunikasi</b>		
21	Gagal mengkomunikasikan sasaran, status dsb.	3.00	4.00
22	Gagal mendengarkan <i>stakeholder</i>	4.00	4.00
	<b>Manajemen stakeholder</b>		
23	Mengabaikan <i>stakeholder</i> (pemangku kepentingan)	2.50	3.00
24	Tidak memperhatikan kebutuhan dan ekspektasi <i>stakeholder</i>	2.13	3.00
	<b>Eksekusi proyek</b>		
25	Tidak memasukan perencanaan yang baik	4.10	4.13
26	Miskin dalam penggunaan sumber daya	4.00	4.00
27	Kurang kontrol dan koordinasi	3.09	4.14
28	Gagal dalam menyelesaikan permasalahan dan konflik secara cepat	4.09	4.00
29	Miskin kerjasama	3.10	3.86

Sebagaimana terlihat pada Tabel 3, faktor-faktor risiko dengan nilai 4 point atau lebih ada 3 faktor risiko pada bagian perencanaan, 4 faktor risiko pada bagian perubahan, 1 faktor risiko pada bagian penjadwalan, 1 faktor risiko pada bagian dukungan manajemen, 1 faktor risiko pada bagian sumber daya, 1 faktor risiko pada bagian komunikasi, dan 3 faktor risiko pada bagian eksekusi proyek. Faktor-faktor risiko yang masuk dalam kelompok ini merupakan faktor risiko dominan. Namun demikian penilaian ini belum cukup untuk memasukkannya kedalam kategori berisiko tinggi apabila belum memperhitungkan penilaian dari sisi dampak risiko.

Faktor-faktor risiko dengan nilai dampak dominan terjadi pada kelompok perencanaan ada 2 faktor, kelompok perubahan ada 2, penjadwalan 2, dukungan manajemen 1, pendanaan 2, sumber daya 2, komunikasi 2, dan eksekusi proyek 4. Faktor risiko yang masuk dalam kelompok ini merupakan risiko dengan dampak besar namun demikian nilai dampak suatu risiko belum dapat menentukan faktor risiko sesungguhnya. Sebagaimana disebutkan sebelumnya bahwa suatu risiko merupakan perkalian antara probabilitas terjadinya tinggi dan memiliki dampak yang tinggi pula oleh karena itu aktivitas proyek PLTN yang berkaitan dengan faktor risiko ini harus benar-benar diperhatikan dan dikelola dengan baik. Kalaupun karena berbagai hal faktor tersebut terpaksa harus terjadi maka perlu disiapkan rencana mitigasinya yaitu segala upaya untuk mengurangi risiko.

Sesuai dengan aturan dalam Matriks Boston, nilai 1 s/d 5 merupakan risiko rendah, 6 s/d 12 risiko sedang, dan 15 s/d 25 masuk dalam risiko tinggi. Untuk mempermudah penentuan status, biasanya nilai risiko lebih dari 13,44 dikelompokkan dalam risiko tinggi. Dari tabel 4 nampak ada 15 faktor risiko tinggi yang ditandai dengan warna merah, dan ada 14 faktor risiko sedang yang ditandai dengan warna kuning. Risiko tinggi merupakan risiko dengan probabilitas terjadinya tinggi dan memiliki dampak yang tinggi pula oleh karena itu aktivitas proyek PLTN yang berkaitan dengan faktor risiko ini harus benar-benar diperhatikan dan dikelola dengan baik. Kalaupun karena berbagai hal faktor tersebut terpaksa harus terjadi maka perlu disiapkan rencana mitigasinya yaitu segala upaya untuk mengurangi risiko.

Dari sudut pandang manajemen proyek, hasil analisis ini memberikan petunjuk bahwa pada saat merencanakan suatu proyek PLTN maka hal-hal yang harus dihindari : banyak coba-coba, gagal dalam mendefinisikan struktur pekerjaan proyek, gagal dalam

menentukan *deadline* dan *milestone*, jadwal proyek yang tidak realistis, gagal dalam menganalisis hambatan dan risiko, dan sumber daya yang tidak mencukupi. Perubahan yang tidak diperkenankan dalam proyek PLTN adalah peningkatan biaya dan modifikasi jadwal proyek, perubahan desain dan pekerjaan, perubahan lingkup proyek, dan perubahan rejim pemerintahan dan komitmen. Dari sisi organisasi maka hal yang tidak diperbolehkan adalah kurangnya dukungan dan keterlibatan dari manajemen puncak. Dari sisi komunikasi harus dihindarkan kegagalan dalam mendengarkan keinginan *stake holder*. Dalam eksekusi proyek : perencanaan pelaksanaan proyek harus dibuat dengan baik, hindarkan miskin dalam penggunaan sumber daya, dan gagal dalam menyelesaikan permasalahan dan konflik secara cepat. Faktor-faktor risiko warna kuning masih bisa ditoleransi terjadinya dengan berbagai persyaratan yang harus dipenuhi, misalkan pada faktor risiko nomor 1, faktor ini bisa diijinkan terjadi dengan syarat manajer, staf, dan pelaksana proyek sudah sangat berpengalaman dalam menjalankan proyek yang sama. Demikian juga untuk faktor risiko nomor 2, bisa diijinkan terjadi dengan syarat merupakan proyek pengulangan, dan personal proyek sudah sangat berpengalaman.

Pada kasus risiko nomor 13 dan 14 bisa ditolerir terjadi dengan catatan manajer proyek mampu mengerahkan seluruh sumber daya yang ada sehingga tiap tahap pekerjaan dapat diselesaikan dengan tepat waktu. Dalam kasus ini tidak dimungkinkan terjadinya penundaan suatu aktivitas proyek. Jika kedua persyaratan tersebut tidak bisa dipenuhi maka jangan coba-coba untuk mengalokasikan waktu penyelesaian proyek yang pendek. Faktor risiko nomor 16 menyebabkan lamanya waktu pengerjaan dan penyelesaian proyek, jika *stake holder* mengijinkan bisa saja terjadi dengan syarat manajer proyek mampu mengalokasikan sumber daya dan waktu yang cukup. Faktor risiko nomor 17 dan 18 akan menyebabkan penyelesaian proyek tertunda, pada kasus ini bisa diijinkan dengan syarat jadwal penyelesaian proyek memberi ruang waktu yang memadai dan segala risiko keuangan akibat penundaan ini telah dilindungi nilainya. Faktor risiko nomor 19 dan 20 akan menyebabkan pengerjaan proyek berjalan lambat yang berakibat pada *cost overrun*. Kasus ini bisa diijinkan terjadi dengan catatan seluruh pembengkakan biaya akibat ini sudah diperhitungkan secara menyeluruh. Faktor risiko nomor 21, akan menyebabkan personal proyek kurang fokus pada sasaran proyek, akibatnya target proyek secara keseluruhan akan terganggu. Jika faktor ini diizinkan maka variabel waktu dan biaya harus diberikan kelonggaran untuk menyeimbangkan kondisi.

Faktor risiko 23 dan 24, bisa menyebabkan terjadinya ketidakharmonisan pada unsur waktu, kualitas dan biaya. Tentu hal ini akan mengakibatkan jalannya proyek sangat terganggu, seperti terjadinya penolakan hasil pekerjaan, penolakan terhadap klaim biaya dan pada sisi regulasi bisa terjadi penolakan perijinan. Jika sumber daya mencukupi manajer proyek dan pelaksana proyek harus menyiapkan mitigasi agar memberikan hasil tiap tahapan proyek dengan kualitas baik, biaya yang rendah dan tepat dalam alokasi waktu. Pada kasus nomor 27 dan 29, menyebabkan terjadinya keterlamabatan penyelesaian proyek, kualitas rendah, dan biaya yang besar. Jika kondisi ini harus terjadi maka manajer proyek harus menyediakan SOP dan instruksi kerja yang detail dan memadai.

**Tabel 4. Hasil penilaian risiko**

NO.	FAKTOR RISIKO	INDEKS		Nilai Total (PXD)	Status
		Probabilitas	Dampak		
	<b>Perencanaan</b>				
1	Tujuan, sasaran dan persyaratan proyek tidak didefinisikan secara jelas dari awal	3.00	3.00	9.00	YELLOW
2	Perencanaan dilakukan dengan data yang tidak mencukupi	2.88	4.00	11.50	YELLOW
3	Banyak coba-coba	4.00	4.25	17.00	RED
4	Gagal untuk mendefinisikan WBS ( <i>Work Breakdown Structure</i> )	3.67	3.80	13.93	RED
5	Gagal dalam menentukan <i>deadline</i> dan <i>milestone</i>	3.80	4.00	15.20	RED
6	Skedul proyek tidak realistis	4.00	3.60	14.40	RED

7	Gagal dalam menganalisis hambatan dan risiko	4.33	3.80	16.47	RED
8	Alokasi sumber daya tidak mencukupi	4.00	3.60	14.40	RED
	<b>Perubahan</b>				
9	Peningkatan biaya dan modifikasi jadwal pada proyek	4.33	3.88	16.79	RED
10	Perubahan desain dan pekerjaan	4.00	3.75	15.00	RED
11	Perubahan lingkup proyek	4.13	4.00	16.50	RED
12	Perubahan pemerintahan dan kurangnya komitmen dari penguasa	4.00	4.00	16.00	RED
	<b>Penjadwalan</b>				
13	Kerangka waktu yang disediakan untuk menyelesaikan proyek terlalu pendek	3.00	4.00	12.00	YELLOW
14	Terlalu optimis dengan tenggat waktu proyek	3.00	4.00	12.00	YELLOW
	<b>Dukungan Manajemen</b>				
15	Kurangnya dukungan dan keterlibatan dari manajemen puncak	4.00	4.00	16.00	RED
16	Kekurangan peralatan dan ketrampilan khusus	3.00	3.80	11.40	YELLOW
	<b>Pendanaan</b>				
17	Menghentikan dana selama proyek berlangsung	3.00	4.00	12.00	YELLOW
18	<i>Kiss of death to the project</i> (Biaya dan waktu meluncur tak terkendali)	3.00	4.00	12.00	YELLOW
	<b>Sumber daya</b>			24.00	
19	Sumber daya manusia yang tidak memadai menyebabkan proyek bergerak lambat	3.00	4.00	12.00	YELLOW
20	Investasi awal pendidikan dari investor dan pabrikan rendah	3.00	4.00	12.00	YELLOW
	<b>Komunikasi</b>				
21	Gagal mengkomunikasikan sasaran, status dsb.	3.00	4.00	12.00	YELLOW
22	Gagal mendengarkan <i>stakeholder</i>	4.00	4.00	16.00	RED
	<b>Manajemen stakeholder</b>				
23	Mengabaikan <i>stakeholder</i> (pemangku kepentingan)	2.50	3.00	7.50	YELLOW
24	Tidak memperhatikan kebutuhan dan ekspektasi <i>stakeholder</i>	2.13	3.00	6.38	YELLOW
	<b>Eksekusi proyek</b>				
25	Tidak memasukan perencanaan yang baik	4.10	4.13	16.91	RED
26	Miskin dalam penggunaan sumber daya	4.00	4.00	16.00	RED
27	Kurang kontrol dan koordinasi	3.09	4.14	12.81	YELLOW
28	Gagal dalam menyelesaikan permasalahan dan konflik secara cepat	4.09	4.00	16.36	RED
29	Miskin kerjasama dalam pelaksanaan proyek	3.10	3.86	11.96	YELLOW

## KESIMPULAN

- 1) Dalam proyek PLTN ada 15 faktor risiko tinggi dan 14 faktor risiko sedang. Faktor risiko tinggi tidak diijinkan terjadi sedangkan faktor risiko sedang dapat diijinkan terjadi dengan persyaratan tertentu dan harus disiapkan mitigasinya.
- 2) Hasil analisis menunjukkan bahwa banyak coba-coba, gagal dalam mendefinisikan struktur pekerjaan, jadwal proyek yang tidak realistis, perubahan desain dan pekerjaan, perubahan lingkup, perubahan pemerintahan dan komitmen merupakan faktor-faktor dengan risiko sangat tinggi.

## DAFTAR PUSTAKA

- 1) Anthony Mills, A Systematic Approach to Risk Management for Construction, Structural Survey, Volume 19, Number 5, 2001, pp. 245-252, MCB University Press, ISSN 0263-080X
- 2) Frame, J. Davidson. (2003). Managing Risk in Organization: A Guide for Managers, San Francisco: Jossey-Bass.
- 3) Kountur, Ronny. (2006). Manajemen Risiko, Jakarta: PPM
- 4) Hoffman, David. (2002). Managing Operational Risk, John Willey & Sons, Inc.
- 5) Harold Kerzner, Ph.D.(2006). *Project Management*, Ninth Edition, Willey & Son
- 6) Dipohusodo. (1996). *Manajemen Konstruksi*, Jakarta, Kanisius
- 7) PMBOK. (2004). *Project Management Body of Knowledge*, Third Edition
- 8) Wulfram, Ervianto. (2004). *Manajemen Proyek Konstruksi*, Yogyakarta, ANDI Offset
- 9) Soeharto, Iman. (1998). *Manajemen Proyek Dari Konseptual Sampai Operasional*, Jakarta, Erlangga
- 10) <http://digilib.its.ac.id/ITS-paper-91121150008244/39865> .Trijoko Wahyu Adi, Suly Yunwanti. Pemodelan Estimasi Biaya Kontingensi Berbasis Risiko Pada Proyek Engineering-Procurement-Construction.
- 11) <http://e-journal.uajy.ac.id/1515/3/2TS12381.pdf>
- 12) Project Management in Nuclear Power Plant Construction: Guidelines and Experience, IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-2.7
- 13) Nuclear power plant organization and staffing for improved performance: lessons learned, IAEA Tecdoc-1052
- 14) [https://en.wikipedia.org/wiki/Atucha\\_II\\_Nuclear\\_Power\\_Plant](https://en.wikipedia.org/wiki/Atucha_II_Nuclear_Power_Plant)
- 15) [https://en.wikipedia.org/wiki/Cernavod%C4%83\\_Nuclear\\_Power\\_Plant](https://en.wikipedia.org/wiki/Cernavod%C4%83_Nuclear_Power_Plant)
- 16) Mun, Jonathan. (2006). Modeling Risk, New Jersey: John Willey & Sons
- 17) Norris, Catriona, Perry, John, & Simon, P. (2000). Project Risk Analysis and Management. Buckinghamshire: The Association for Project Management
- 18) Office of Project Management Process Improvement. (2003). Project Risk Management Handbook. Sacramento
- 19) Taha, Hamdy A. (2003). Operation Research : An Introduction Seventh Edition. New Jersey: Pearson Education.
- 20) Smith, D.J. (1994). Incorporating Risk Into Capital Budgeting Decisions Using Simulation. Management Decisions (Vol. 32, No. 9)

## DISKUSI/TANYA JAWAB :

### 1. PERTANYAAN :

Analisis risiko yang dilakukan kan general, bagaimana analisis risiko jika PLTN berada pada daerah dengan karakteristik khusus?

### JAWABAN :

Dalam analisis risiko penilaian sudah mempertimbangkan pada fakta-fakta yang biasa terjadi dimana lokasi PLTN dibangun sehingga penilaian sudah sesuai dengan karakteristik yang ada.

### 2. PERTANYAAN :

Pada analisis risiko tersebut dapat diketahui dan diindentifikasi beberapa risiko dan nilainya, apakah sudah dibuatkan mitigasinya?

**JAWABAN :**

Pada makalah lengkap mitigasi untuk masing-masing faktor risiko sudah dibuat sebagai upaya untuk memberikan solusi atas risiko yang mungkin akan terjadi

## PENGARUH KETERLAMBATAN PADA TAHAP PRA DAN PASCA KONSTRUKSI TERHADAP BIAYA POKOK PRODUKSI LISTRIK PLTN

Rizki Firmansyah Setya Budi<sup>1,2</sup>, Wiku Lulus Widodo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Pusat Kajian Sistem Energi Nuklir – Badan Tenaga Nuklir Nasional, Jl. Kuningan Barat, Mampang Prapatan, Jakarta Selatan

<sup>2</sup> Program Pasca Sarjana Departemen Teknik Elektro dan Teknologi Informasi - UGM, Jl. Grafika, Bulak Sumur, Sleman, D.I. Yogyakarta  
email: rizkifirmansyah@batan.go.id

### ABSTRAK

**PENGARUH KETERLAMBATAN PADA TAHAP PRA DAN PASCA-KONSTRUKSI TERHADAP BIAYA POKOK PRODUKSI LISTRIK PLTN.** Keterlambatan pembangunan PLTN dapat terjadi pada tahap pra-konstruksi, konstruksi, dan pasca-konstruksi. Keterlambatan pada setiap tahap tersebut akan mengakibatkan dampak terhadap perubahan biaya pokok pembangkitan (BPP) PLTN yang berbeda-beda. Penelitian sebelumnya telah melakukan analisis tentang dampak keterlambatan pada tahap konstruksi terhadap BPP PLTN. Penelitian ini akan melakukan perhitungan dan analisis dampak keterlambatan pembangunan PLTN pada tahap pra dan pasca-konstruksi terhadap BPP PLTN. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui seberapa besar dampak keterlambatan pada setiap tahap tersebut terhadap perubahan BPP PLTN. Hasil penelitian menunjukkan bahwa besar kecilnya perubahan BPP PLTN akibat terjadinya keterlambatan pembangunan ditentukan oleh seberapa banyak biaya investasi PLTN yang telah digunakan sebelum terjadinya keterlambatan. Keterlambatan pada tahap pra-konstruksi PLTN tidak memberikan dampak perubahan BPP PLTN. Hal tersebut disebabkan karena pada penelitian ini menggunakan asumsi pada tahap pra-konstruksi masih belum menggunakan biaya investasi PLTN. Keterlambatan pada tahap pasca-konstruksi memberikan dampak paling besar terhadap perubahan, mencapai 2,23 kali BPP PLTN normal. Oleh karena itu diperlukan perhatian khusus dari operator PLTN khususnya terhadap regulasi-regulasi yang ada agar tidak terjadi keterlambatan.

Kata kunci: keterlambatan, pra-konstruksi, pasca-konstruksi, BPP, PLTN.

### ABSTRACT

**THE IMPACT OF PRA AND POST-CONSTRUCTION DELAY TO NUCLEAR POWER PLANT GENERATION COST.** Delay in the construction of nuclear power plants (NPP) can occur in the pre-construction, construction, and post-construction stages. Delays at each of these stages will have an impact on the changes of NPP generation cost differently. Previous research had been done analysis on the impact of delay at construction stage. This research calculates and analyses the impact of delays in the construction of NPP in the pre and post-construction stages. The purpose of this research is to find out the impact of the delay at each stage to the changes of NPP generation cost. It is hoped that by using the research results, the owner of NPP can find out at what stage they should pay greater attention. The results showed that the changes of NPP generation cost depends on the investment cost of NPP that had been used before the delay occurred. The delay in the pre-construction stage did not affect the generation cost because in this research assumed that at the pre-construction stage did not use the investment cost of NPP. Delays in the post-construction stage have the greatest impact on the changes of the generation cost and reach 2.23 times of normal generation cost. Therefore, special attention was needed, especially on the NPP regulation..

Keyword: Delay, pre-construction, post-construction, generation cost, NPP

### PENDAHULUAN

Keterlambatan dapat didefinisikan dengan penambahan waktu untuk menyelesaikan sebuah proyek[1]. Selain mengakibatkan bertambahnya waktu, keterlambatan akan mengakibatkan bertambahnya biaya yang dibutuhkan untuk menyelesaikan proyek tersebut. Keterlambatan dapat dibedakan menjadi 5 jenis, yaitu: *excusable delay*, *non-excusable delay*, *compensable delay*, *non-compensable*, dan *concurrent delay*[1] [2].

*Excusable delay* adalah keterlambatan yang disebabkan oleh *force majeure* seperti bencana alam yang tidak terduga. Pada jenis keterlambatan ini, kontraktor proyek akan diberikan tambahan waktu oleh pemilik proyek, tetapi pemilik proyek tidak memberikan tambahan dana untuk menyelesaikannya[2], [3]. *Non-excusable delay* adalah keterlambatan yang terjadi karena kesalahan dari pihak kontraktor. Pada jenis keterlambatan ini, kontraktor tidak diberikan tambahan waktu maupun dana oleh pemilik proyek[2], [4]. *Compensable delay* adalah keterlambatan yang terjadi karena kesalahan pemilik proyek, seperti kurang lengkapnya desain dan spesifikasinya. Pada jenis keterlambatan ini, kontraktor akan mendapatkan tambahan waktu dan dana dari pemilik proyek[2][5]. *Non-compensable delay* adalah keterlambatan yang disebabkan oleh adanya campur tangan dari pihak ketiga diluar kewenangan kontraktor, seperti demonstrasi penolakan dan perubahan regulasi pemerintah. Pada jenis keterlambatan ini, kontraktor biasanya akan mendapatkan tambahan waktu tetapi tidak mendapatkan tambahan dana untuk menyelesaikan proyek.[2], [6]. *Concurrent delay* adalah keterlambatan yang disebabkan oleh beberapa faktor, tetapi tidak ada satupun dari faktor tersebut yang dapat digunakan oleh kontraktor sebagai alasan untuk mendapatkan tambahan waktu maupun dana[2], [7]. Keterlambatan akan menyebabkan bertambahnya biaya dan waktu yang dibutuhkan untuk menyelesaikan proyek[8]. Oleh karena itu, perlu dilakukan identifikasi kemungkinan keterlambatan yang dapat terjadi dan dampak keterlambatan tersebut.

Berdasarkan waktu kejadiannya, keterlambatan dapat dibedakan menjadi 3 macam, yaitu: pra konstruksi, konstruksi, dan pasca-konstruksi[8]. Keterlambatan pada pra konstruksi dapat disebabkan oleh perijinan dan kesiapan desain[9]. Keterlambatan pada waktu konstruksi dapat disebabkan oleh pasokan bahan atau alat, permasalahan dalam pembangunan, maupun perubahan kebijakan pemerintah. Keterlambatan pasca-konstruksi dapat disebabkan oleh pengaruh regulasi[8].

Proyek PLTN merupakan proyek yang sangat rentan dalam hal keterlambatan[10], [11]. Biaya investasi yang besar menyebabkan dampak dari adanya keterlambatan terhadap keekonomian proyek PLTN menjadi sangat signifikan. Waktu kejadian keterlambatan yang berbeda akan menimbulkan dampak yang berbeda. Keterlambatan pada pra-konstruksi akan memberikan dampak yang berbeda dibandingkan jika keterlambatan terjadi pada tahap konstruksi maupun pasca konstruksi, begitu pula sebaliknya. Oleh karena itu dibutuhkan sebuah penelitian yang melakukan analisis dampak keterlambatan pembangunan PLTN pada setiap tahap konstruksi (pra-konstruksi, konstruksi, dan pasca-konstruksi) sehingga dapat diketahui seberapa besar dampak keterlambatan tersebut terhadap BPP PLTN. Berdasarkan informasi besarnya dampak yang ditimbulkan tersebut, maka pemilik proyek dapat memberikan perhatian yang lebih pada tahap konstruksi tersebut.

Penelitian [12], [13] melakukan analisis terhadap penggunaan metode *pre-construction planning* untuk mengatasi potensi terjadinya keterlambatan pada tahap pra konstruksi. Penelitian [14] melakukan analisis terhadap dampak keterlambatan pembangunan PLTA skala besar yang terjadi pada tahap pra konstruksi. Keterlambatan tersebut akan menyebabkan membengkaknya biaya dan berpengaruh negatif terhadap keekonomian proyek. Penelitian [15] melakukan mitigasi terhadap terjadinya keterlambatan penyelesaian proyek konstruksi di Arab Saudi dengan menggunakan metode *Performance Information Procurement System*.

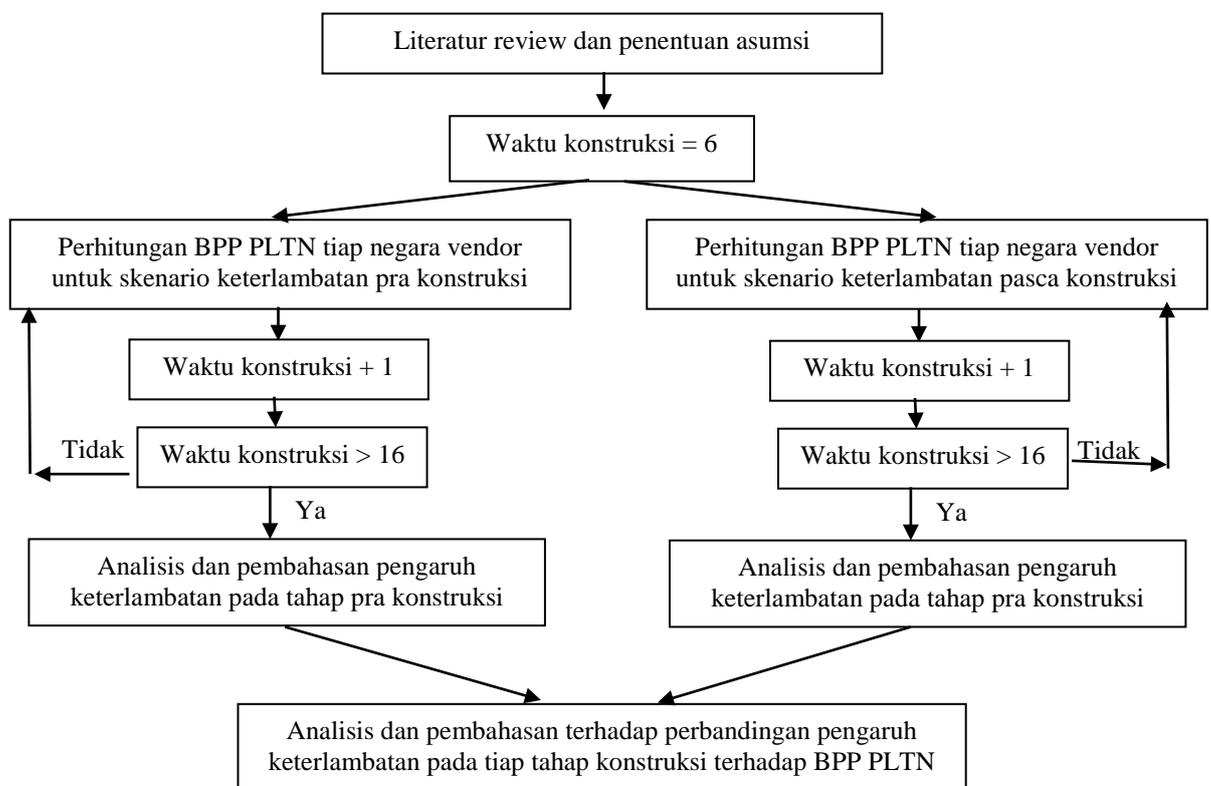
Penelitian [11] telah melakukan analisis dampak keterlambatan pembangunan PLTN pada tahap konstruksi. Hasil penelitian [11] menunjukkan bahwa keterlambatan pembangunan pada tahap konstruksi tersebut menyebabkan terjadinya peningkatan biaya pokok pembangkitan (BPP) tenaga listrik PLTN. Sedangkan penelitian [10] melakukan analisis tentang komponen BPP PLTN yang memberikan kontribusi paling besar terhadap peningkatan BPP ketika terjadi keterlambatan pada tahap konstruksi.

Berdasarkan penelitian-penelitian sebelumnya[10]–[15], dapat diperoleh informasi bahwa penelitian tentang keterlambatan pembangunan sebuah proyek, tidak terkecuali proyek PLTN telah banyak dilakukan. Analisis tentang penyebab keterlambatan dan bagaimana cara mengantisipasinya pun telah banyak di bahas dalam penelitian-penelitian sebelumnya baik pada tahap pra-konstruksi, konstruksi, maupun pasca-konstruksi. Penelitian [11] telah melakukan analisis dampak keterlambatan pembangunan PLTN pada tahap konstruksi terhadap BPP PLTN. Akan tetapi, penelitian yang melakukan analisis perbandingan dampak keterlambatan pada tahap pra-konstruksi dan pasca-konstruksi proyek PLTN masih belum ada.

Penelitian ini akan melakukan perhitungan dan analisis dampak keterlambatan pembangunan PLTN pada tahap pra dan pasca-konstruksi terhadap BPP PLTN. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui seberapa besar dampak keterlambatan pada tahap pra dan pasca konstruksi terhadap biaya pokok pembangkitan. Hasil penelitian ini akan dibandingkan juga dengan hasil penelitian [11] sehingga dapat diketahui dampak keterlambatan pada setiap tahap pembangunan. Dengan menggunakan hasil penelitian ini, maka pemilik proyek dapat mengetahui ada pada tahap mana mereka akan memberikan perhatian yang lebih besar.

**METODOLOGI**

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan diagram alir seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Penelitian ini menggunakan asumsi bahwa pembangunan PLTN pada kondisi normal adalah 6 tahun[16], *discount rate* 10%[17], tidak ada biaya tambahan ketika terjadi keterlambatan baik pra maupun pasca konstruksi, dan tidak ada peningkatan biaya investasi PLTN.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini menggunakan 2 skenario keterlambatan, yaitu keterlambatan pada tahap pra konstruksi dan keterlambatan pada tahap pasca-konstruksi. Pada kedua skenario tersebut dilakukan sensitivitas analisis dengan mengubah lama waktu keterlambatan mulai dari 1 tahun hingga 10 tahun.

Perhitungan biaya pokok pembangkitan (BPP) listrik PLTN dilakukan menggunakan persamaan 1[10], [11], [18]. Perhitungan BPP menggunakan data biaya dari 10 negara vendor, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

$$LCOE = \frac{\sum_t \left( \frac{Investment_t + O\&C_t + Fuel_t + Decom_t}{(1+r)^t} \right)}{\sum_t \left( \frac{E_t}{(1+r)^t} \right)} \tag{1}$$

Dengan:

Investment<sub>t</sub> = Biaya investasi tahun ke t (USD)

O&C <sub>t</sub>	= Biaya O&M tahun ke t (USD)
Fuel <sub>t</sub>	= Biaya bahan bakar dan limbah tahun ke t (USD)
Decom <sub>t</sub>	= Biaya dekomisioning dan <i>refurbishment</i> tahun ke t (USD)
r	= <i>Discount rate</i> (%)
E <sub>t</sub>	= Produksi energi listrik tahun ke t (kWh)

Biaya investasi, biaya O&M, biaya bahan bakar dan limbah, dan biaya dekomisioning dan *refurbishment* diperoleh dengan menggunakan data pada Tabel 1. Biaya investasi diperoleh dengan mengalikan antara IC dengan kapasitas pembangkit. Biaya O&M diperoleh dengan cara mengalikan OC dengan produksi energi listrik. Biaya bahan bakar dan limbah diperoleh dengan cara mengalikan FC dengan produksi energi listrik. Biaya dekomisioning dan *refurbishment* diperoleh dengan cara mengalikan DC dengan produksi energi listrik[19]. Sedangkan produksi energi listrik diperoleh dengan cara mengalikan kapasitas pembangkit dengan faktor kapasitasnya. Faktor kapasitas PLTN yang digunakan pada penelitian ini adalah 0,9[20], [21].

Tabel 1. Biaya PLTN tiap Negara Vendor[16]

Negara	Kapasitas (MWe)	IC (USD/kWe)	OC (USD/MWh)	DC (USD/MWh)	FC (USD/MWh)
Belgia	1600	5081	13,55	0,02	10,46
Finlandia	1600	4896	14,59	0,01	5,09
Perancis	1630	5067	13,33	0,01	9,33
Hungaria	1180	6215	10,4	0,06	9,6
Jepang	1152	3883	27,43	0,02	14,15
Korea	1343	2021	9,65	0,01	8,58
Slovakia	1070	4986	10,17	0,83	12,43
Inggris	3300	6070	20,93	0,02	11,31
Amerika	1400	4100	11	0,26	11,33
Cina	1250	2615	7,32	0,01	9,33
Cina	1080	1807	6,5	0,01	9,33

Tabel 2. *Disburshment* Biaya Investasi Sesaat untuk Tiap Waktu Konstruksi

Keterlambatan (tahun)	Skenario	Disburshment (%)															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0	Pra	0,07	0,18	0,25	0,25	0,18	0,07										
	Pasca	0,07	0,18	0,25	0,25	0,18	0,07										
1	Pra	0,00	0,07	0,18	0,25	0,25	0,18	0,07									
	Pasca	0,07	0,18	0,25	0,25	0,18	0,07	0,00									
2	Pra	0,00	0,00	0,07	0,18	0,25	0,25	0,18	0,07								
	Pasca	0,07	0,18	0,25	0,25	0,18	0,07	0,00	0,00								
3	Pra	0,00	0,00	0,00	0,07	0,18	0,25	0,25	0,18	0,07							
	Pasca	0,07	0,18	0,25	0,25	0,18	0,07	0,00	0,00	0,00							
4	Pra	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,18	0,25	0,25	0,18	0,07						
	Pasca	0,07	0,18	0,25	0,25	0,18	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00						
5	Pra	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,18	0,25	0,25	0,18	0,07					
	Pasca	0,07	0,18	0,25	0,25	0,18	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00					
6	Pra	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,18	0,25	0,25	0,18	0,07				
	Pasca	0,07	0,18	0,25	0,25	0,18	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				
7	Pra	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,18	0,25	0,25	0,18	0,07			
	Pasca	0,07	0,18	0,25	0,25	0,18	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
8	Pra	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,18	0,25	0,25	0,18	0,07		
	Pasca	0,07	0,18	0,25	0,25	0,18	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
9	Pra	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,18	0,25	0,25	0,18	0,07	
	Pasca	0,07	0,18	0,25	0,25	0,18	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
10	Pra	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,18	0,25	0,25	0,18	0,07
	Pasca	0,07	0,18	0,25	0,25	0,18	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Perbedaan antara skenario keterlambatan pada tahap pra konstruksi dengan skenario keterlambatan pada tahap pasca-konstruksi terletak pada *disburshment* biaya investasi. *Disburshment* biaya investasi pada kedua skenario tersebut ditunjukkan pada Tabel 2.

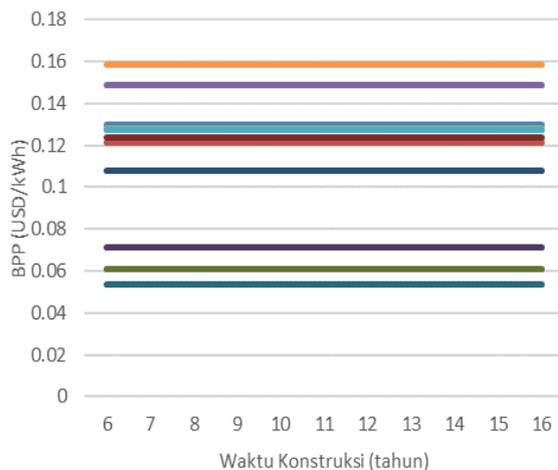
Beberapa metode yang sering digunakan untuk melakukan analisis dan pembahasan adalah metode analisis komparasi, metode analisis trend, metode analisis

deskriptif, metode pembahasan deskriptif kualitatif, dan metode pembahasan kuantitatif[22]–[24]. Analisis keterlambatan pada tahap pra-konstruksi, dan pasca-konstruksi dilakukan dengan menggunakan metode analisis trend dan analisis deskriptif. Analisis trend akan melakukan analisis terhadap pola pengaruh keterlambatan pada tahap pra konstruksi dan pasca-konstruksi. Analisis deskriptif digunakan untuk menjelaskan fenomena yang didapat dengan menggunakan analisis trend beserta penyebab dari munculnya fenomena tersebut.

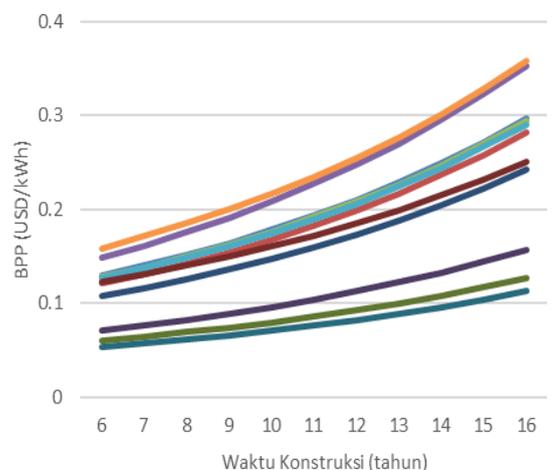
Setelah dilakukan analisis pada tahap pra dan pasca-konstruksi secara terpisah, penelitian ini akan melakukan analisis komparasi pengaruh keterlambatan terhadap BPP PLTN pada setiap tahap, yaitu tahap pra-konstruksi, konstruksi, dan pasca-konstruksi. Analisis komparasi adalah analisis dengan menggunakan perbandingan dari beberapa data yang ada (data pembandingan)[24], [25]. Pengaruh keterlambatan pada tahap konstruksi menggunakan data hasil penelitian [11]. Hasil penelitian [11] tersebut akan dijadikan sebagai data pembandingan (*benchmarking*) untuk mengetahui seberapa besar pengaruh keterlambatan pada tahap pra dan pasca konstruksi. Penelitian ini melakukan pembahasan dengan menggunakan metode deskriptif kualitatif dan deskriptif kuantitatif.

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, diperoleh hasil seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2 dan Gambar 3. Gambar 2 menunjukkan pengaruh keterlambatan pembangunan PLTN pada tahap pra-konstruksi. Keterlambatan pada tahap pra-konstruksi tidak memberikan dampak terhadap nilai BPP. Hal tersebut disebabkan karena pada penelitian ini menggunakan asumsi bahwa sebelum proses konstruksi, belum ada biaya investasi yang digunakan. Kegiatan yang terdapat pada tahap pra-konstruksi ini adalah proses perijinan dan persiapan desain yang diasumsikan biaya yang dibutuhkan pada proses tersebut diluar dari biaya investasi (*overnight cost*).



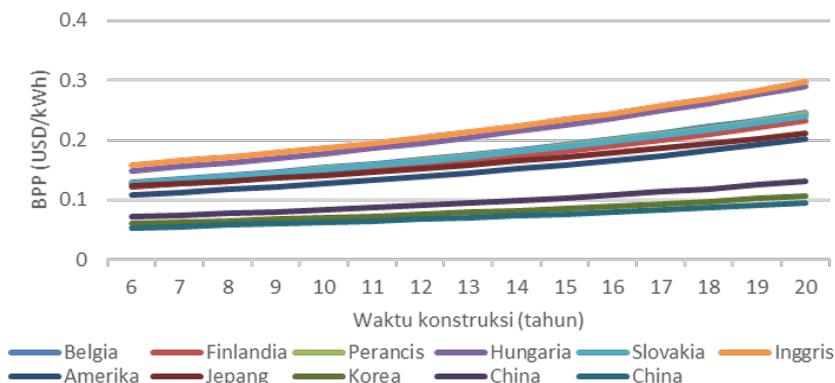
Gambar 2. Pengaruh Keterlambatan pada Tahap Pra-konstruksi terhadap BPP PLTN



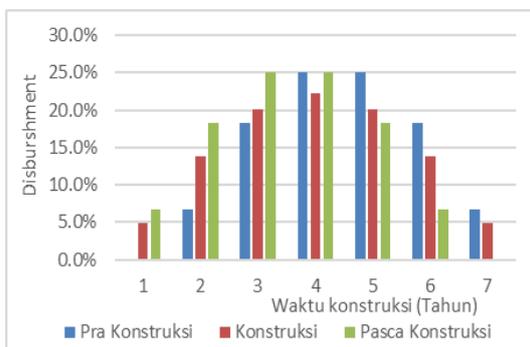
Gambar 3. Pengaruh Keterlambatan pada Tahap Pasca-konstruksi terhadap BPP PLTN

Gambar 3 menunjukkan pengaruh keterlambatan pembangunan PLTN pada tahap pasca-konstruksi. Trend perubahan nilai BPP terhadap keterlambatan yang terjadi hampir sama dengan trend perubahan nilai BPP pada hasil penelitian [11], yaitu terdapat 2 kategori laju pertumbuhan BPP pada negara-negara vendor PLTN tersebut. Kategori pertama adalah Amerika Serikat, Jepang, Korea, dan Cina. Kategori kedua terdiri dari Belgia, Finlandia, Perancis, Hungaria, Slovakia, dan Inggris. Hasil penelitian [11] ditunjukkan pada Gambar 4. Perbedaan pengaruh keterlambatan pada tahan pasca-konstruksi dengan pada tahap konstruksi adalah besarnya perubahan BPP yang dihasilkan. Perubahan BPP PLTN ketika

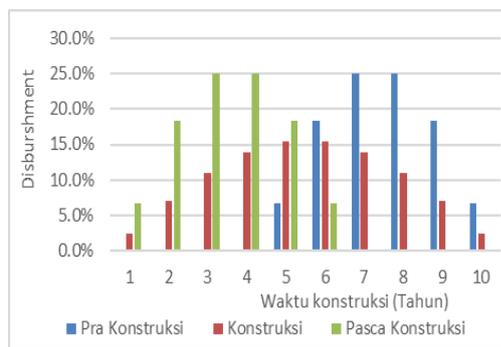
terjadi keterlambatan pada tahap pasca-konstruksi lebih besar jika dibandingkan pada tahap konstruksi. Hal tersebut disebabkan karena pada tahap pasca-konstruksi, biaya yang digunakan jauh lebih besar jika dibandingkan pada tahap konstruksi. Biaya yang lebih besar tersebut yang menyebabkan semakin besarnya perubahan BPP ketika terjadi keterlambatan. Penyebab perbedaan hasil perubahan BPP PLTN pada tiap tahap tersebut dapat dilihat dengan lebih jelas dengan menggunakan kurva nilai disbursement pada setiap tahap. Gambar 5 menunjukkan disbursement pada saat terjadi keterlambatan 1 tahun ( waktu konstruksi = 7 tahun). Gambar 6 menunjukkan disbursement pada saat terjadi keterlambatan 4 tahun (waktu konstruksi = 10 tahun). Gambar 7 menunjukkan disbursement pada saat terjadi keterlambatan 7 tahun (waktu konstruksi = 13 tahun). Gambar 8 menunjukkan disbursement pada saat terjadi keterlambatan 10 tahun (waktu konstruksi = 16 tahun).



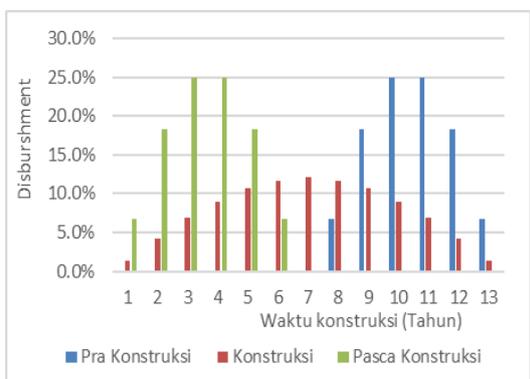
Gambar 4. Pengaruh Keterlambatan pada Tahap Konstruksi terhadap BPP PLTN[11]



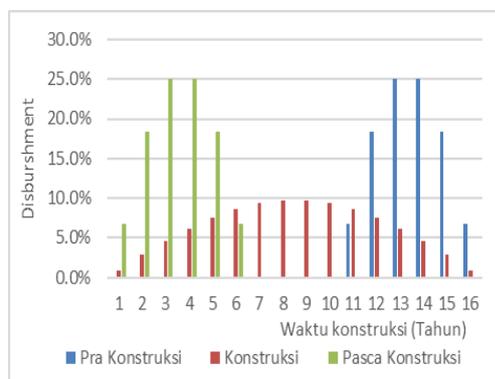
Gambar 5. Disbursement pada saat terdapat keterlambatan 1 tahun



Gambar 6. Disbursement pada saat terdapat keterlambatan 4 tahun



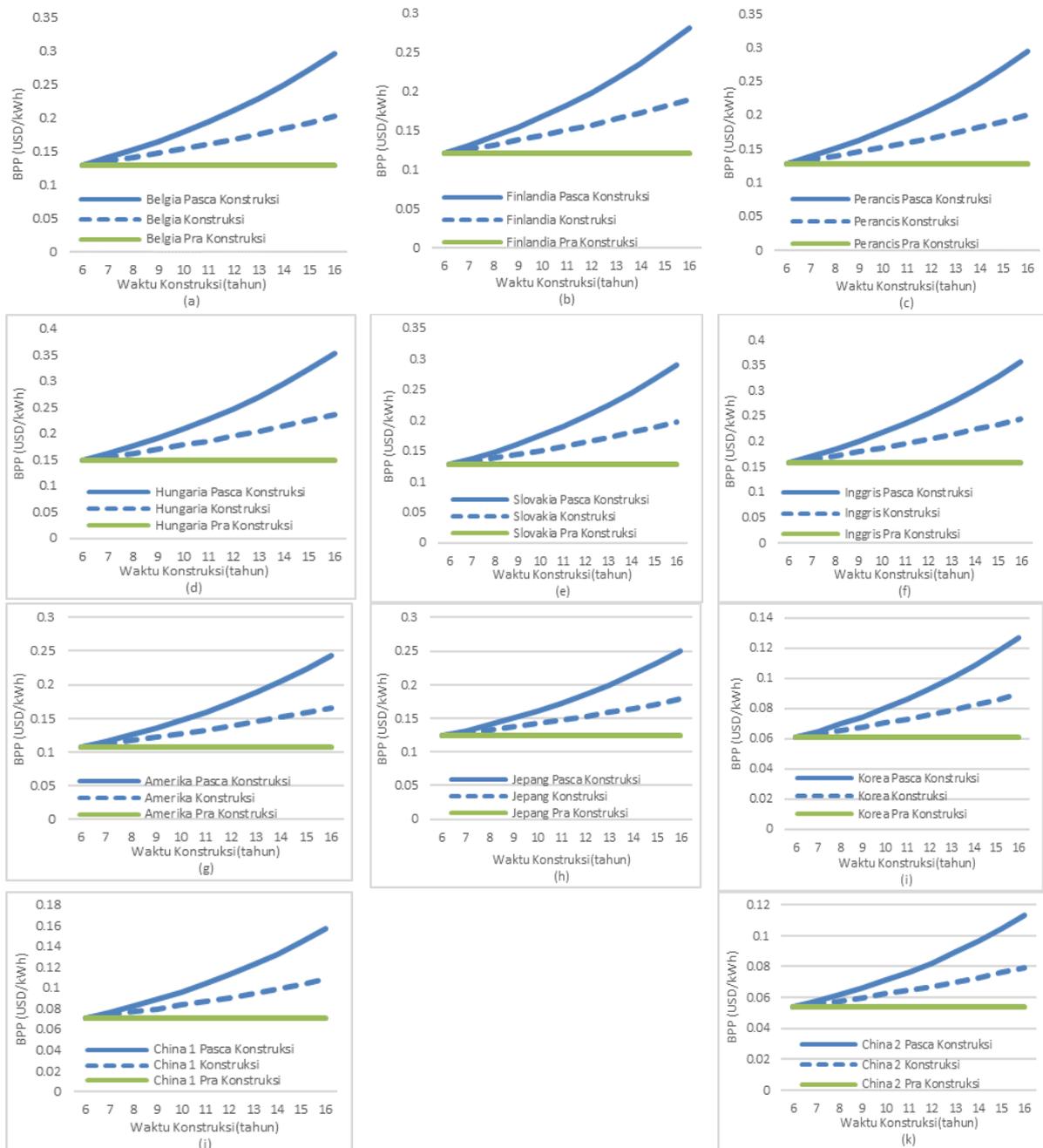
Gambar 7. Disbursement pada saat terdapat keterlambatan 7 tahun



Gambar 8. Disbursement pada saat terdapat keterlambatan 10 tahun

Perbedaan disbursement seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5 sampai dengan Gambar 8 menyebabkan adanya perbedaan pengaruh keterlambatan pembangunan pada tiap tahap konstruksi terhadap perubahan BPP PLTN. Semakin banyak biaya investasi yang

telah digunakan sebelum terjadi keterlambatan akan menyebabkan semakin besar perubahan BPP PLTN. Hal tersebut sesuai dengan hasil perbandingan pengaruh keterlambatan terhadap BPP PLTN. Gambar 9 menunjukkan perbandingan pengaruh keterlambatan pada tiap tahap konstruksi terhadap perubahan BPP PLTN pada negara-negara vendor PLTN.



Gambar 9. Perbandingan pengaruh keterlambatan pada tiap tahap konstruksi terhadap BPP PLTN

PLTN dari semua negara vendor PLTN menunjukkan respon yang sama ketika terjadi keterlambatan, yaitu keterlambatan pada pasca konstruksi mempunyai pengaruh yang paling besar terhadap perubahan BPP PLTN. Keseragaman hasil dari semua PLTN tersebut disebabkan karena komposisi BPP PLTN yang selalu sama (komponen biaya investasi mempunyai porsi yang paling besar jika dibandingkan dengan komponen bahan bakar dan O&M). Keseragaman porsi komponen BPP tersebut yang menyebabkan mempunyai respon perubahan yang sama.

Keterlambatan pada tahap pasca-konstruksi mengakibatkan peningkatan BPP PLTN yang jauh lebih besar jika dibandingkan pada tahap pra-konstruksi maupun konstruksi. Oleh karena itu diperlukan perhatian lebih agar pada tahap pasca-konstruksi tidak terjadi keterlambatan. Tabel 3 menunjukkan rata-rata perubahan BPP PLTN negara-negara vendor ketika terjadi keterlambatan pada tiap tahap pembangunan. Nilai standar yang digunakan sebagai BPP acuan adalah BPP ketika tidak terjadi keterlambatan. Dengan kata lain ketika BPP PLTN mempunyai nilai 1, hal itu berarti BPP tersebut sama dengan BPP PLTN ketika tidak terjadi keterlambatan pembangunan. Perubahan BPP terbesar terjadi pada saat terjadi keterlambatan pada tahap pasca-konstruksi dengan nilai mencapai 2,23 pada saat terjadi keterlambatan 10 tahun. Hal tersebut berarti BPP ketika terjadi keterlambatan 10 tahun pada tahap pasca-konstruksi akan mencapai 2.23 kali BPP PLTN normal (ketika tidak ada keterlambatan).

**Tabel 3. Rata-rata perubahan BPP PLTN negara-negara vendor pada tiap tahap pembangunan**

	Waktu konstruksi (tahun)										
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Pra konstruksi	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Konstruksi	1	1.04	1.08	1.13	1.17	1.23	1.29	1.34	1.40	1.46	1.53
Pasca Konstruksi	1	1.08	1.16	1.25	1.36	1.47	1.59	1.73	1.88	2.04	2.23

Penyebab utama keterlambatan pada tahap pasca-konstruksi adalah hal-hal yang berhubungan dengan regulasi[8]. Salah satu contoh yang baru saja terjadi adalah keterlambatan *start up* PLTN Barakah akibat operator PLTN tersebut tidak dapat memenuhi persyaratan regulasi dari badan pengawas nuklir Uni Emirates Arab[26]. Oleh karena itu, operator PLTN di Indonesia harus mempersiapkan dengan baik persyaratan-persyaratan yang berhubungan dengan syarat untuk memenuhi regulasi yang ada.

## KESIMPULAN

Besar kecilnya perubahan BPP PLTN akibat terjadinya keterlambatan pembangunan ditentukan oleh seberapa banyak biaya investasi (*overnight cost*) PLTN yang telah digunakan sebelum terjadinya keterlambatan. Semakin besar biaya investasi yang telah digunakan, maka semakin besar perubahan BPP PLTN ketika terjadi keterlambatan. Keterlambatan pada tahap pra-konstruksi PLTN tidak memberikan dampak perubahan BPP PLTN. Hal tersebut disebabkan karena pada penelitian ini menggunakan asumsi pada tahap pra-konstruksi masih belum menggunakan biaya investasi PLTN. Keterlambatan pada tahap pasca-konstruksi memberikan dampak paling besar terhadap perubahan BPP PLTN, mencapai 2,23 kali BPP PLTN normal. Oleh karena itu diperlukan perhatian khusus dari operator PLTN khususnya terhadap regulasi-regulasi yang ada agar tidak terjadi keterlambatan.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kami ucapkan kepada Kepala Bidang Kajian Infrastruktur PKSENBATAN dan rekan-rekan Bidang Kajian Infrastruktur atas bantuan dan data-data yang mendukung penelitian ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. Hamzah, M. A. Khoiry, I. Arshad, N. M. Tawil, and A. I. C. Ani, "Cause of Construction Delay - Theoretical Framework," *Procedia Eng.*, vol. 20, pp. 490–495, 2011.
- [2] R. Masood *et al.*, "Investigating the Delay Factors of Construction Projects in Metropolitan City of a Developing Country," *J. Civ. Eng. Archit. Res.*, vol. 2, no. 9, pp. 947–955, 2015.
- [3] M. A. Yusof, N. Mohammad, and Z. Mat Derus, "Excusable and Compensable Delays in the Construction of Building Project - A Study in the States of Selangor and Wilayah Persekutuan Kuala Lumpur, Malaysia," *Journal-The Inst. Eng.*, vol. 68, no. 4, pp. 21–26, 2007.
- [4] O. T. Ibrinke, T. O. Oladinrin, O. Adeniyi, and I. V. Eboime, "Analysis of non-

- excusable delay factors influencing contractors' performance in Lagos State, Nigeria," *J. Constr. Dev. Ctries.*, vol. 18, no. 1, pp. 53–72, 2013.
- [5] S. Hegazy, "Delay Analysis Methodology in UAE Construction Projects : Delay Claims , Literature Review," *PM World J.*, vol. 10, no. 2, pp. 1–21, 2012.
- [6] J. Yang and C. Kao, "Review of Delay Analysis Methods: A Process-Based Comparison," *Open Constr. Build. Technol. J.*, vol. 3, no. 1, pp. 81–89, 2009.
- [7] F. Arif and A. A. Morad, "Concurrent delays in construction legal perspective," *J. Leg. Aff. Disput. Resolut. Eng. Constr.*, vol. 6, no. 1, pp. 1–4, 2014.
- [8] T. Gebrehiwet and H. Luo, "Analysis of Delay Impact on Construction Project Based on RII and Correlation Coefficient : Empirical Study," *Procedia Eng.*, vol. 196, pp. 366–374, 2017.
- [9] Aleksander Srdic and Jana Selih, "Delays in Construction Projects - Causes and Mitigation," *An Int. J. -Organization, Technol. Manag. Constr.*, vol. 7, no. 3, pp. 1383–1389, 2015.
- [10] R. F. S. Budi and Nuryanti, "Analisis Respon Komponen Biaya Pokok Produksi Listrik terhadap Keterlambatan Waktu Konstruksi PLTN," in *Prosiding Seminar Nasional IPTEK Nuklir Dasar dan Terapan*, 2018, pp. 1–12.
- [11] R. F. S. Budi and W. L. Widodo, "Pengaruh Waktu Konstruksi terhadap Biaya Pokok Produksi Listrik Pusat Listrik Tenaga Nuklir," in *Prosiding Seminar Nasional Soebardjo Brotohardjono*, 2018, pp. 1–7.
- [12] A. Abbas, Z. U. Din, and R. Farooqui, "Achieving Greater Project Success & Profitability through Pre-construction Planning: A Case-based Study," *Procedia Eng.*, vol. 145, pp. 804–811, 2016.
- [13] B.-G. Hwang and J. W. Ho, "Front-End Planning Implementation in Singapore: Status, Importance, and Impact," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 138, no. 4, pp. 567–573, 2012.
- [14] J. P. Braeckman and P. Guthrie, "A typology of the effects of pre-construction delay for large hydropower projects," *Hydropower Dams*, no. 2, pp. 105–113, 2016.
- [15] M. Alzara, J. Kashiwagi, D. Kashiwagi, and A. Al-Tassan, "Using PIPS to Minimize Causes of Delay in Saudi Arabian Construction Projects: University Case Study," *Procedia Eng.*, vol. 145, no. 480, pp. 932–939, 2016.
- [16] OECD, *Projected Costs of Generating Electricity*. 2015.
- [17] Bank Sentral Republik Indonesia, "Data BI Rate." .
- [18] Nuryanti and Suparman, "Probabilistic Analysis on Levelized Unit Electricity Cost ( LUEC ) Calculation of Small Medium Reactor Nuclear Power Plant ( SMR NPP ) In Indonesia," in *International Conference on Nuclear Energy Technologies and Sciences*, 2015, vol. 2016, no. 2016, pp. 1–10.
- [19] R. F. S. Budi and W. L. Widodo, "Analisis Sensitivitas Biaya Investasi PLTN dalam Perencanaan Kelistrikan Kalimantan Barat," *Pros. Semin. Nas. Teknol. Energi Nukl. 2015*, pp. 1–9, 2015.
- [20] P. K. Kanti and N. Sanathkumar, "A Review Paper on Nuclear Power Plant and Its Importance in Indian Economy," pp. 244–247, 2016.
- [21] I. Piro and R. Duffey, "Nuclear Power as a Basis for Future Electricity Generation," *J. Nucl. Eng. Radiat. Sci.*, vol. 1, no. 1, p. 011001, 2015.
- [22] R. F. S. Budi and W. L. Widodo, "Analisis kemampuan potensi energi nasional untuk mewujudkan ketahanan nasional," in *Prosiding Seminar Nasional Energi 4*, 2015, pp. 46–57.
- [23] Elinur, D. S. Priyarsono, M. Tambunan, and M. Firdaus, "Perkembangan Konsumsi dan Penyediaan Energi dalam Perekonomian Indonesia," *Indones. J. Agric. Econ. ( IJAE )*, vol. 2, no. 1, pp. 97–119, 2010.
- [24] D. I. A. Pratama, B. M. Setiawan, and E. Prasetyo, "Analisis Komparasi Usaha Tani Padi Semi Organik dan Non Organik di Kecamatan Undaan Kabupaten Kudus," *Agrisociconomics-Jurnal Sos. Ekon. Pertan.*, vol. 2, no. 1, pp. 14–22, 2018.
- [25] A. Nauw, R. A. M. Koleangan, and E. N. Walewangko, "Analisis perbandingan sektor ekonomi unggulan kabupaten sorong dan kota sorong," *J. Berk. Ilm. Efisiensi*, vol. 15, no. 04, pp. 160–170, 2015.
- [26] Reuters, "UAE delays start-up of first nuclear plant as operator not ready." [Online]. Available: <https://www.reuters.com/article/emirates-nuclear-idAFL8N1PP2VC>. [Accessed: 20-Sep-2018].

Halaman ini sengaja di kosongkan

## POTENSI PEMANFAATAN PANAS PLTN TIPE HTGR UNTUK INDUSTRI DI PROVINSI BANTEN

Dharu Dewi, Siti Alimah

Pusat Kajian Sistem Energi Nuklir (PKSEN) \_ BATAN, Jalan Kuningan Barat, Mampang Prapatan,  
Jakarta 12710

email: dharu\_dewi@batan.go.id

### ABSTRAK

#### POTENSI PEMANFAATAN PANAS PLTN TIPE HTGR UNTUK INDUSTRI DI PROVINSI BANTEN.

Pembangunan industri di Provinsi Banten semakin meningkat. Saat ini terdapat sekitar 20 kawasan industri yang tersebar di Provinsi Banten, meliputi Kota Tangerang, Kabupaten Tangerang, Kabupaten Serang dan Kota Cilegon. Peningkatan industri tersebut meningkatkan kebutuhan energi. Energi yang digunakan untuk memenuhi kebutuhan industri tersebut saat ini berasal dari jenis sumber daya energi fosil yang tak terbarukan seperti bahan bakar minyak (BBM), batubara dan gas alam. Untuk mengurangi ketergantungan pada penggunaan sumber daya energi fosil, suatu alternatif sumber daya energi lain perlu dipertimbangkan yaitu Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN). *High Temperature Gas Cooled Reactor* (HTGR) merupakan salah satu tipe PLTN yang selain memasok energi listrik, panasnya dapat dimanfaatkan untuk proses industri. Oleh karena itu, pemanfaatan panas PLTN tipe HTGR untuk industri di Provinsi Banten perlu dikaji. Studi ini bertujuan mengidentifikasi industri yang ada di Provinsi Banten, yang membutuhkan energi panas temperatur tinggi, yang kemungkinan dapat dipasok dari panas PLTN tipe HTGR. Metode yang digunakan adalah kajian literatur, pencarian data melalui *website* dan analisis data industri yang menggunakan temperatur tinggi. Industri yang membutuhkan panas dengan kisaran temperatur yang cukup tinggi adalah industri baja, besi, pencairan/gasifikasi batubara, produksi hidrogen, produksi stirena, etilena, kilang minyak, pengolahan minyak dari pasir minyak, desulfurisasi minyak mentah dan lain lain. Hasil studi memperlihatkan bahwa industri yang ada di Provinsi Banten sebagian besar terdiri dari industri besi, industri baja dan industri kimia. Pemanfaatan panas dan energi listrik HTGR cocok digunakan karena terdapat 20 kawasan industri sehingga HTGR memiliki potensi sebagai energi alternatif yang dapat digunakan sebagai pembangkit *captive power* pada industri untuk memenuhi kebutuhan sendiri. Sumber energi fosil jika digunakan terus menerus dapat mengakibatkan berkurangnya cadangan bahan bakar fosil. Oleh karena itu pemanfaatan PLTN tipe HTGR melalui sistem kogenerasi dapat dimanfaatkan sebagai pembangkit alternatif untuk memenuhi kebutuhan panas dan energi listrik bagi industri.

Kata kunci: industri, temperatur tinggi, pemanfaatan panas, PLTN, HTGR.

### ABSTRACT

#### The UTILIZATION POTENCY OF HEAT NPP WITH HTGR TYPE FOR INDUSTRIES IN BANTEN PROVINCE.

These Industrial development in Banten Province is increasing, currently there are about 20 industrial areas scattered in Banten Province, including Tangerang City, Tangerang Regency, Serang Regency and Cilegon City. The increase in the industry increases energy demand. The energy used to meet the needs of the industry today comes from non-renewable fossil energy resources such as diesel, coal and natural gas. To reduce dependency on the use of fossil energy resources, another alternative energy resource needs to be considered namely Nuclear Power Plant (NPP). HTGR is one type of nuclear power plant that in addition to supplying electrical energy, heat can be used for industries processes. Therefore, potential use of heat NPP with type HTGR for industry in Banten Province needs to be studied. This study aims to identify existing industries in Banten Province, which require high temperature heat energy, which may be supplied from NPP heat with HTGR type. The method used in the study is the assessment of literature and analysis of industrial data using high temperature industries that require heat with high temperature range are steel, iron, coal liquefaction/ gasification, hydrogen production, styrene production, ethylene, oil refineries, oil processing from oil sands, desulfurization of crude oil and others. The industries in addition to requiring heat energy also requires electrical energy. The results of the study show that some industries in Banten Province

mostly consists of iron industries, steel industries and chemical industries. The utilization of HTGR heat and electrical energy is suitable used in 20 industrial areas in Province Banten. This HTGR have potency as alternative energy that can be used as captive power generation in industries to meet their own needs. For the use of electrical energy, the use of electrical energy from HTGR can also be used because fossil energy sources if they are used continuously can lead to reduced reserves of fossil fuels. Therefore, the use of HTGR type nuclear power plants through a cogeneration system can be used as alternative plants to meet the heat and electrical energy needs for the industries.

Keyword: industry, high temperature, use of heat, NPP, HTGR

## PENDAHULUAN

Saat ini pembangunan industri semakin meningkat pesat seiring pertumbuhan penduduk. Semakin meningkatnya pembangunan industri menyebabkan kebutuhan energi juga semakin meningkat. Sektor industri hingga saat ini merupakan sektor yang mendominasi konsumsi energi di Indonesia, mencapai 49,4 persen dari total konsumsi energi nasional, baik digunakan sebagai bahan bakar maupun bahan baku [1]. Sektor industri di Indonesia yang dinilai paling banyak menggunakan energi teridentifikasi ada 7 jenis industri yaitu industri baja, industri semen, industri pupuk, industri keramik, industri pulp dan kertas, industri tekstil dan industri pengolahan kelapa sawit. Sedangkan saat ini industri yang membutuhkan energi terbesar, secara berturut-turut adalah industri pupuk, industri pulp dan kertas, industri tekstil, industri semen, industri baja, industri keramik, dan industri pengolahan kelapa sawit. Total kebutuhan energi pada 7 industri tersebut mencapai sekitar 70 persen dari total kebutuhan pada sektor industri [1]. Pada tahun 2014 hingga tahun 2030, kebutuhan energi diperkirakan akan mengalami kenaikan 6,5% per tahun atau mengalami kenaikan hampir empat kali lipat [2]. Total konsumsi energi sektor industri pada 2009 adalah sebesar 301 juta SBM (Setara Barel Minyak) dan pada tahun 2014 sebesar 391 juta SBM.

Energi yang digunakan untuk memenuhi kebutuhan industri, sebagian besar berasal dari jenis sumber daya energi yang tak terbarukan seperti solar, batubara dan gas alam. Oleh karena itu diperlukan tindakan dan kebijakan yang tepat untuk menghindari eksploitasi yang terus menerus, yang berdampak berkurang atau habisnya cadangan energi dari bahan bakar fosil. Dalam tahun 2007, jumlah bahan bakar fosil untuk memasok energi di dunia sekitar 80% dan untuk pembangkitan listrik dunia sekitar 67% [3]. Pada Oktober 2014, pemerintah Indonesia memberlakukan Peraturan Pemerintah No. 79 tahun 2014 mengenai kebijakan energi nasional yang digunakan sebagai pedoman utama dalam pengelolaan energi nasional untuk mencapai keamanan energi domestik. Target utama kebijakan energi nasional dari tiap jenis energi primer mulai dari tahun 2025 sampai 2050 yakni [1];

- proporsi energi baru dan terbarukan sekitar 23 % pada tahun 2025 dan sedikitnya 31 % pada tahun 2050.
- Proporsi minyak kurang dari 25 % pada tahun 2025 dan kurang dari 20 % pada tahun 2050.
- Proporsi batubara minimal 30 % di 2025 dan minimum 25 persen di tahun 2050.
- Proporsi gas minimal 22 % 2025 dan minimum 24 % di tahun 2050.

Dengan demikian persentase bahan bakar fosil (minyak, batubara, dan gas) yang dapat digunakan untuk memasok energi di Indonesia adalah sekitar 77 % pada tahun 2025 dan sekitar 69 % pada tahun 2050.

Salah satu tindakan untuk menekan penggunaan bahan bakar fosil adalah penggunaan energi alternatif. Penggunaan PLTN tipe HTGR (*High Temperature Gas-cooled Reactor*) selain dapat menghasilkan listrik, energi panasnya dapat diaplikasikan untuk memenuhi kebutuhan panas proses di industri dan merupakan salah satu energi alternatif yang dapat dipertimbangkan. HTGR mempunyai sistem keselamatan melekat dan dapat beroperasi pada keluaran temperatur tinggi, sebagai contoh HTTR yang mempunyai temperatur keluaran sekitar 950°C, yang mana lebih tinggi dari Reaktor Air Ringan (*Light Water Reactor*) konvensional [4]. HTGR memenuhi persyaratan untuk koogenerasi, temperatur dan tekanan panas proses yang diperlukan industri dapat dipasok sesuai kebutuhan [5].

Desain PLTN tipe HTGR, pada dasarnya berbeda dibanding LWR (*Light Water Reactor*). HTGR berpendingin helium, moderator grafit, dan reaktor spektrum neutron thermal [6, 7]. Selain itu juga menggunakan partikel bahan bakar berlapis keramik di dalam matriks grafit. Teknologi HTGR telah dikembangkan dan didemonstrasikan lebih dari 50 tahun di beberapa negara diantaranya Amerika Serikat, Jepang, Jerman, China dan Inggris [8]. Produksi panas proses HTGR dapat menggantikan sebagian besar penggunaan bahan bakar fosil, sehingga akan mengurangi emisi CO<sub>2</sub> ke lingkungan [9]. Panas proses yang diproduksi HTGR ini kompetitif dengan bahan bakar fosil [10].

Pemanfaatan teknologi HTGR untuk memenuhi kebutuhan energi di industri melalui kogenerasi untuk memasok listrik dan uap panas untuk proses industri seperti produksi hidrogen, *Enhanced Oil Recovery* (EOR), gasifikasi/pencairan batubara, desalinasi, industri petrokimia, amoniak dan pupuk, kilang minyak dan industri lain (seperti produksi aluminium, pembuatan baja, industri kimia). Desain instalasi HTGR mampu memasok energi ke proses industri dalam bentuk uap, listrik dan gas temperatur tinggi untuk proses yang diinginkan [11,12]. Menurut V. Klimova (2016), HTGR sebagai sumber energi untuk proses industri dapat mencapai panas tinggi antara 800 – 1000°C [13].

Berdasarkan data Kementerian Perindustrian, pada tahun 2013, Indonesia memiliki 74 kawasan industri dengan sebaran 55 kawasan industri di Pulau Jawa, 16 kawasan industri di Pulau Sumatera, 1 kawasan industri di Pulau Kalimantan, dan 2 kawasan industri di Pulau Sulawesi [14]. Kawasan industri di pulau Jawa meliputi Banten, Jakarta, Jawa Tengah, Jawa Timur dan Jawa Barat. Pembatasan studi ini hanya mengkaji industri di provinsi Banten, karena di provinsi Banten telah dilakukan studi tapak PLTN dan diperoleh tapak-tapak kandidat terseleksi [15].

Provinsi Banten merupakan salah satu provinsi yang memiliki banyak industri besar di Indonesia. Provinsi ini memiliki 20 kawasan industri. Berbagai industri manufaktur pada wilayah ini memiliki kebutuhan energi listrik dan energi panas jumlah besar dalam proses pengoperasiannya. Industri baja/besi serta industri kimia mendominasi di wilayah ini. Pada makalah ini, dilakukan kajian untuk mengetahui industri-industri potensial yang membutuhkan energi panas tinggi dan sekaligus energi listrik. Karena itu, studi ini bertujuan mengidentifikasi industri yang menggunakan energi panas temperatur tinggi di provinsi Banten, yang dapat dipasok dari panas PLTN tipe HTGR.

## TEORI

HTGR adalah salah satu jenis reaktor daya tipe maju yang mempunyai sistem keselamatan pasif dan melekat (*inherent and passive safety*) yang sangat handal. Fitur desain HTGR menggunakan grafit sebagai moderator dan reflektor, teras berpendingin helium, dengan temperatur masuk reaktor sekitar 250-400°C dan tekanan 7 MPa [16], bahan bakar partikel berlapis didispersi dalam matriks grafit dan teras berdensitas daya rendah sekitar 3-7 W/cc [17]. Penggunaan bahan teras yang bersifat tahan panas dikombinasi dengan pendingin helium menyebabkan temperatur pendingin bisa mencapai sekitar 950°C [6,18], sehingga rentang pemanfaatan temperatur pendingin ini luas digunakan untuk industri. Keselamatan melekat sangat tinggi pada reaktor, sehingga hampir tidak mungkin terjadi kecelakaan pelelehan teras. Efisiensi termal HTGR dapat mencapai 45%-50% [19] yang mana lebih tinggi dari LWR yang hanya sekitar 33%. Bahan bakar HTGR menggunakan partikel bahan bakar berlapis yang mengandung material dapat belah dan atau dapat biak, dalam bentuk uranium dioksida (UO<sub>2</sub>), uranium bikarbida (U-Th)C<sub>2</sub>, uranium thorium oksida (U-Th)O<sub>2</sub> atau plutonium oksida (PuO<sub>2</sub>) [8, 20] dengan lapisan pirokarbon dan silikon karbida. Partikel berlapis didesain mampu menahan tekanan gas internal yang tinggi tanpa pelepasan produk fisi ke lingkungan. Fitur peningkatan keselamatan, efisiensi thermal tinggi, kompetitif ekonomi dan pertahanan proliferasi, membuat teknologi ini mempunyai potensi pasar PLTN.

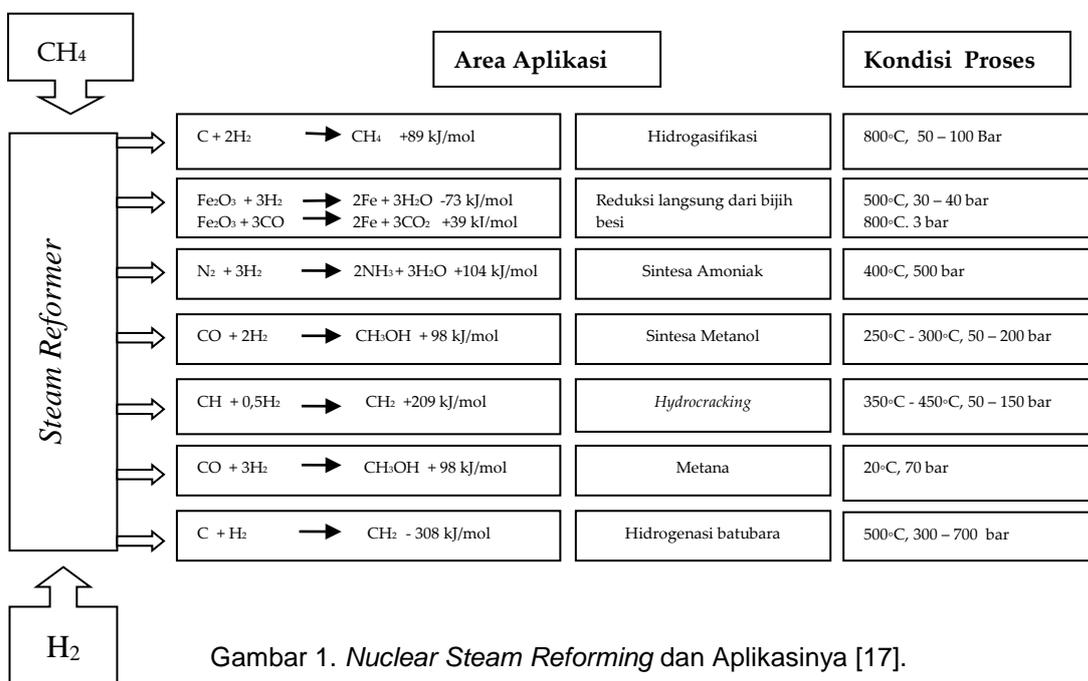
HTGR dapat dibagi menjadi 3 kategori berdasarkan temperatur operasi yaitu HTGR konvensional yang didesain untuk operasi sampai 785°C, Advance HTGR (AHTGR) yang didesain untuk operasi sampai 850°C dan *Very High Temperature Gas-cooled Reactor* (VHTR) yang didesain untuk operasi sampai 950°C yang saat ini dalam pengembangan sebagai reaktor generasi IV [17].

Hal lain yang menarik dari HTGR adalah kemampuan menghasilkan panas temperatur tinggi. Panas tersebut dapat digunakan untuk berbagai proses industri, yaitu untuk produksi hidrogen dengan metode SR (*Steam Reforming*) dan siklus IS (*Iodine Sulfur*),

pembuatan baja, gasifikasi/pencairan batubara, desalinasi, pemanasan wilayah perkotaan (*district heating*) dan lain-lain [21, 22].

*Steam reforming* adalah proses thermokimia yang umumnya digunakan di dalam industri produksi hydrogen [23]. Prosesnya adalah mereaksikan metana dan *steam* pada temperatur tinggi dalam suatu *reformer* [24]. Temperatur masuk *reformer* primer 530–650°C dan keluar 770–811°C, tekanan 35–40 kg/cm<sup>2</sup>. Temperatur masuk *reformer* sekunder 520–560°C dan keluar 920–1050°C, tekanan 35 kg/cm<sup>2</sup> [25]. Hidrogen tersebut sebagai sumber komersial untuk hidrogasifikasi, reduksi langsung bijih besi, sintesa amoniak, sintesa methanol, *hydrocracking*, methanasi, hidrogenasi batubara, seperti diperlihatkan dalam Gambar 1.

Konsep HTGR untuk memasok kebutuhan panas industri baja diperlihatkan dalam Gambar 2. Dengan pemanfaatan panas untuk berbagai industri, maka teknologi ini menjanjikan untuk pasar HTGR. Selain itu konsep teknologi HTGR juga merupakan teknologi reaktor SMR (*Small And Medium Reactors*) yaitu reaktor dengan daya kecil dan menengah, yang dapat dikonstruksi di wilayah dengan kapasitas transmisi daya listrik terbatas dan ketersediaan air pendingin rendah [26].





menunjang pertumbuhan ekonomi nasional. Teknologi HTGR cocok untuk pasokan panas industri pada kisaran temperatur 250-950°C. Kisaran ini, lebih tinggi dari kisaran temperatur teknologi reaktor berpendingin air.

Kawasan industri yang ada di provinsi Banten terdiri dari 20 kawasan yaitu Balaraja Industrial Park, CCM Balaraja Industrial Estate, Graha Balaraja Sentra Produksi & Distribusi, Jababeka Industrial Estate-Cilegon, Kawasan Industri & Pergudangan Cikupamas, Kawasan Industri Terpadu MGM, Krakatau Industrial Estate Cilegon (KIEC), Langgeng Sahabat Industri Estate, Millenium Industrial Estate, Kawasan Modern Cikande Industrial Estate, Nikomas Gemilang Industrial Estate, Pancatama Industrial Estate, Pasar Kemis Industrial Park, Petrochemical Industri Estate Pancapuri, Samanda Perdana Industrial Estate, Saur Industrial Estate, Taman Tekno Bumi Serpong Damai Park, West Tangerang Industrial Estate Cikupa, Kawasan Industri Wilmar Bojonegara dan Kawasan Industri Cileles Tangerang Banten. Sektor industri di kawasan provinsi Banten tersebut, mendominasi kebutuhan tenaga listrik terbesar, yaitu dengan pangsa sekitar 65%, sedangkan sektor rumah tangga menempati posisi kedua dengan pangsa kebutuhan sekitar 25% [27]. Di dalam kawasan industri tersebut, terdapat berbagai jenis industri, dan sektor industri yang memanfaatkan panas temperatur tinggi antara lain industri logam dasar, beberapa industri kimia, industri batubara dan pengilangan minyak bumi.

Penggunaan energi di industri baja pada umumnya digunakan untuk proses peleburan *scrap* baja [28]. Proses peleburan menggunakan tungku peleburan, proses perlakuan panas menggunakan *reheating furnace*, proses pembentukan logam dan proses *finishing*. Sumber energi untuk proses peleburan adalah listrik, kokas dan bahan bakar lainnya untuk setiap peleburan (panas). Penggunaan energi terbesar dalam proses peleburan adalah peralatan *electric arc furnace* dan atau *induction furnace*. Di setiap proses dalam industri baja membutuhkan temperatur yang berbeda-beda. Pada pemrosesan bahan baku, temperatur yang digunakan cukup tinggi, bervariasi tergantung jenis bahan baku, dan berkisar 450-700°C. Sedangkan pada proses peleburan baja, dibutuhkan temperatur yang dapat mencapai 1680°C. Proses *reheating furnace* membutuhkan temperatur 1200-1250°C [29].

Identifikasi beberapa industri dan produknya di provinsi Banten, berdasar temperatur proses yang dibutuhkan diperlihatkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Beberapa Industri yang berada di Provinsi Banten

No.	Nama Industri	Produk	T (°C)
1.	PT. Krakatau Steel	<i>Hot Roll Coil/Plate, Cold Rolled Coil/Sheet, Wire Rod</i>	50 – 1680 [29]
2.	PT. Krakatau Posco	<i>Pressure Vessel Steel, Construction &amp; Heavy Equipment Steel, Shipbuilding Steel, Oil &amp; Gas Steel,</i>	50 – 1680
3.	PT. Cilegon Fabricators	<i>Steel Structure and Container Crane, Boiler Pressure and Piping, Heat Recovery Steam Generator (HRSG), Blasting and Painting</i>	50 – 1680
4.	PT. Siemens Indonesia	<i>Condenser, LP Outer Casing, LP Stationary Blade Ring, Combustion Chamber, Industrial Steam Turbine, Industrial Round Condenser</i>	50 – 1680
5.	PT. Chandra Asri Petrochemical	<i>Ethylene, Propylene, Mixed C4, Pyrolysis Gasoline (Py-Gas), Polyethylene, Polypropylene, Styrene Monomer, Butadiene [30]</i>	185-835[31]
6.	PT. Mitsubishi Chemical Indonesia	<i>Purified Terephthalic Acid (PTA) and Polyethylene Terephthalate (PET) Resin [32]</i>	270-280 [33]
7.	PT. NS Bluescope Indonesia	Baja lapis [34]	50 – 1680
8.	PT. Krakatau Wajatama	<i>Deformed Bar, Plain Bar, Equal Angle, Channel, Wide Flange, H Beam and I Beam [35]</i>	50 – 1680

9.	PT. Cabot Chemical	<i>Carbon Black</i> [36]	1000-1300 [36]
10	PT. Dover Chemical Indonesia	<i>Emulsion Adhesive, Formaldehyde Solution, Formaldehyde Resin</i> [37]	330-380
11	PT. Pacific Indomas Plastic	Poliethilene, Poliurethane	250-500 [31]
12	PT. Polypet Karya Persada	Poliethilene, Poliethilene Resin	250-500 [31]
13	PT. Polyprima Karya Reksa	<i>Purified Terephthalic Acid</i>	200-210 [33]
14	PT. Standar Toyo Polymer	<i>Polyfinyl Chloride (PVC)</i>	100 – 260 [38]
15	PT. Tri Polyta Indonesia	<i>Polypropylene</i>	160 -175 [39]

Pada Tabel 1 di atas terlihat bahwa industri-industri yang ada di Provinsi Banten sebagian besar terdiri dari industri baja dan industri kimia yang membutuhkan pasokan energi panas secara kontinyu, dan kisaran temperatur cukup tinggi. Oleh karena itu, pemanfaatan panas PLTN tipe HTGR mempunyai potensi untuk memasok energi panas di industri-industri tersebut.

Provinsi Banten memiliki 20 kawasan industri yang tersebar di berbagai wilayah. PLTN tipe HTGR dapat digunakan untuk memasok energi listrik dan energi panas temperatur tinggi di wilayah Kawasan industri Provinsi Banten. PLTN tipe HTGR dapat dimungkinkan untuk digunakan sebagai pembangkit *Captive Power* (Swasembada Pengelolaan Kelistrikan) pada kawasan industri tersebut untuk memenuhi kebutuhan sendiri energi panas dan listrik pada sejumlah industri tertentu sebagai energi alternatif pengganti pembangkit energi konvensional/fosil. Definisi *Captive Power* adalah kondisi dimana pihak swasta secara mandiri mengelola penyediaan listrik untuk perusahaan lain di dalam suatu Kawasan Industri dan Kawasan Ekonomi Khusus, terutama di daerah dengan tingkat konektivitas *grid* yang rendah. Pembangkit *Captive Power* dapat beroperasi di luar jaringan (*off grid*) Adapun manfaatnya adalah pembangkit berada di dekat pusat beban dan mengurangi beban kapasitas yang selama ini ditanggung oleh PT. PLN. *Captive Power* menjamin ketersediaan listrik yang andal, sehingga dapat menunjang pertumbuhan aktivitas industri dan perekonomian [40]. PT. KDL sebagai salah satu pemasok jasa kelistrikan di provinsi Banten telah membentuk Unit Otonom Jasa (UOJ), yang berkonsentrasi pada pelayanan atas kebutuhan jasa kelistrikan di kawasan industri Krakatau dan sekitarnya [41]. Unit Otonom Jasa tersebut pada prinsipnya sama dengan pembangkit *Captive Power* karena memenuhi energi listrik di kawasan industri Krakatau dan sekitarnya.

Saat ini kebutuhan energi listrik di berbagai sektor industri di provinsi Banten dipasok dari pembangkit listrik yang terhubung pada sistem interkoneksi JAMALI (Jawa-Madura-Bali). Selain itu juga terdapat pembangkit *captive power* dan pembangkit listrik konvensional. Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Suralaya merupakan pembangkit yang terhubung dalam sistem interkoneksi JAMALI melalui transmisi SUTET (Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi) 500 KV. PLTU Suralaya merupakan pembangkit listrik berbahan bakar batubara terbesar di Indonesia dengan kapasitas 4 x 400 MWe dan 3 x 600 MW, sehingga kapasitas total 3400 MWe. Pembangkit listrik lain adalah PLTGU Cilegon dengan daya 750 MW, yang juga terhubung dengan sistem interkoneksi JAMALI [42].

Salah satu industri di Provinsi Banten yakni PT. Krakatau Steel memiliki anak perusahaan yang bergerak dibidang ketenagalistrikan yaitu PT. Krakatau Daya Listrik (PT. KDL). PT. KDL merupakan salah satu pembangkit yang memenuhi kebutuhan energi di lingkungan Kawasan Industrial Estate Cilegon (KIEC) yang memiliki lima unit Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang masing-masing berkapasitas 80 MW dengan total kapasitas terpasang 400 MW, untuk memenuhi energi yang berada di wilayah kawasan industri Krakatau Steel Cilegon serta konsumen umum mulai dari rumah tangga, perhotelan dan kelompok industri [41]. Jaringan transmisi dan distribusi milik PT. KDL berupa jaringan listrik bawah tanah (*underground*) dan suatu sistem kompensator dibangun untuk menjaga stabilitas tegangan [41]. Selain PLTU Suralaya, PLTGU Cilegon dan PLTU KDL, di Banten terdapat pula PLTU Labuhan dengan kapasitas 600 MW (2 x 300 MW), PLTU Lontar dengan kapasitas 3 x 315 MWe, dan PLTU Teluk Naga dengan kapasitas 600 MW (2x300 MW) [42].

PLTU 3 Banten Lontar merupakan bagian dari Proyek Percepatan Pembangunan Pembangkit 10.000 MW yang didasarkan pada Peraturan Presiden No. 71 tahun 2006. Berdasarkan kontrak PLTU 3 Banten Lontar berlokasi di Teluk Naga. Akan tetapi, dalam pelaksanaannya, rencana lokasi di Teluk Naga disarankan untuk dipindah menjauhi bandara Soekarno-Hatta oleh Departemen Perhubungan, karena berada pada jalur penerbangan. Akhirnya lokasi dipindah ke Desa Lontar, Kecamatan Kemiri, Kabupaten Tangerang, Propinsi Banten dengan syarat tinggi cerobong direndahkan menjadi 127 meter dari rencana semula 160 meter.

Proyek PLTU 3 Banten Lontar dibangun di atas lahan seluas 94 hektar dengan tiga unit pembangkit dimana kapasitas masing-masing unit 315 megawatt sehingga total kapasitas tenaga listrik yang dihasilkan 945 MW. Daya listrik yang dihasilkan PLTU Lontar nantinya akan disalurkan melalui jaringan transmisi 150 kV (SUTT) sepanjang 22 kilometer ke Gardu Induk Teluk Naga dan sepanjang 22 kilometer ke Gardu Induk New Tangerang. Proyek Pembangunan PLTU Lontar ini ditujukan untuk memperkuat pasokan tenaga listrik di area Jakarta dan sekitarnya pada sistem kelistrikan Jawa-Bali [42].

Pertumbuhan kebutuhan tenaga listrik berkorelasi dengan pertumbuhan makro ekonomi. Dengan mengasumsikan pertumbuhan PDRB (*Product Domestic Regional Bruto*) Provinsi Banten sebesar 6%, serta pertumbuhan penduduk rata-rata 2,3% per-tahun, maka kebutuhan tenaga listrik *netto* di Provinsi Banten tahun 2020 diperkirakan hampir mencapai 30 TWh atau sama dengan total kebutuhan daya sebesar 6.000 MW (6 GW) [42]. Total kapasitas terpasang pembangkit listrik yang berada di Provinsi Banten saat ini sekitar 6695 MW atau 6,695 GW (3.400 MW PLTU Suralaya, 750 MW PLTGU Cilegon, 400 MW PLTU KDL, 600 MW PLTU Labuhan, PLTU Lontar 3 x 315 MW dan PLTU Teluk Naga 600 MW). Pembangkit lainnya yang sudah mulai operasi komersial pada bulan Desember 2017 adalah PLTU Banten yang dibangun oleh PT Lestari Banten Energi dengan kapasitas 660 MWe. Pemilik pembangkit ini adalah perusahaan Genting Energy Limited dan telah melakukan perjanjian jual beli listrik (*Power Purchase Agreement*) dengan skema *Build Operate Transfer* (BOT) yang ditandatangani oleh pihak PT. PLN [44]. Penggunaan daya untuk dipasok ke PT. PLN sebesar 625 MWe sedangkan untuk kebutuhan sendiri sebesar 35 MWe.

Pertumbuhan kebutuhan tenaga listrik ini sudah memperhitungkan kebutuhan tenaga listrik dari pelabuhan Bojonegara sekitar 10-15 MW dan kebutuhan tenaga listrik untuk KEK (Kawasan Ekonomi Khusus) Bojonegara sekitar 400 MW dengan mengasumsikan kebutuhan tenaga listrik ke KEK Bojonegara sebesar pasokan listrik ke Kawasan Industri Krakatau Steel yaitu sebesar 400 MW.

Jika melihat total kebutuhan daya tahun 2020 yang sebesar 6000 MW dan total kapasitas terpasang saat ini sebesar 7355 MW maka kebutuhan energi listrik di provinsi Banten telah terpenuhi. Terlihat pada Tabel 1, terdapat berbagai industri di Provinsi Banten yaitu industri besi, industri baja dan industri kimia yang membutuhkan *energi* listrik secara kontinyu dan energi panas dengan temperatur cukup tinggi. PLTU dan PLTGU, serta berbagai industri yang memanfaatkan panas dengan temperatur cukup tinggi saat ini menggunakan sumber daya energi fosil, yang jika digunakan terus menerus dapat mengakibatkan berkurangnya cadangan energi dari bahan bakar fosil, yang semakin lama akan semakin habis. Oleh karena itu, berbagai opsi perlu dilakukan untuk menekan penggunaan energi dari sumber daya energi fosil tersebut. Salah satu opsi adalah dengan pembangunan PLTN, maka dapat menghemat cadangan bahan bakar fosil. Perlu penelitian lebih lanjut untuk menghitung Saat ini terdapat berbagai jenis PLTN, namun PLTN yang dapat menghasilkan listrik dan panas temperatur tinggi adalah jenis HTGR.

## KESIMPULAN

Provinsi Banten memiliki 20 kawasan industri dimana industri yang ada sebagian besar terdiri dari industri besi, industri baja dan industri kimia, yang membutuhkan energi panas dengan temperatur cukup tinggi dan energi listrik secara kontinyu. Saat ini kebutuhan energi tersebut dipasok dari beberapa PLTU, PLTGU dan pembangkit *Captive Power* yang menggunakan sumber energi fosil. Pemanfaatan panas dan energi listrik HTGR cocok digunakan karena terdapat 20 kawasan industri sehingga memiliki potensi sebagai energi alternatif yang dapat digunakan sebagai pembangkit *captive power* pada industri untuk memenuhi kebutuhan sendiri. Sumber energi fosil jika digunakan terus menerus dapat mengakibatkan berkurangnya cadangan bahan bakar fosil. Oleh karena itu pemanfaatan PLTN tipe HTGR melalui sistem kogenerasi dapat diusulkan sebagai pembangkit alternatif

untuk menambah pasokan energi listrik dan memanfaatkan panas temperatur tingginya untuk kebutuhan industri di Provinsi Banten. Perlu penelitian lebih lanjut untuk mengetahui jumlah energi panas yang dibutuhkan untuk industri yang menggunakan panas temperatur tinggi yang ada di Provinsi Banten.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada Kepala Bidang Kajian Infrastruktur dan tim KPTF PKSEN - BATAN yang telah memeriksa makalah ini sehingga menjadi makalah yang lebih sempurna untuk dapat diterbitkan. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada teman – teman panitia seminar yang telah membantu semua proses kelancaran penerbitan makalah.

#### DAFTAR PUSTAKA

1. KEMENTERIAN PERINDUSTRIAN, “Perencanaan Kebutuhan Energi Sektor Industri Dalam Rangka Akselerasi Industrialisasi”, Biro Perencanaan Kementerian Perindustrian Republik Indonesia, 2012.
2. [http://www.majalahtambang.co.id/detail\\_berita.php?category=18&newsnr=5288](http://www.majalahtambang.co.id/detail_berita.php?category=18&newsnr=5288), diakses Pebruari 2014
3. RACHAEL ELDER, RAY ALLEN, “Nuclear Heat for Hydrogen Production : Coupling a Very High/High Temperature Reactor to a Hydrogen Production Plant”, *Journal Progress in Nuclear Energy*, 2009.
4. HIROFUMI OHASHI, et.al., “A Small-Sized HTGR System Design for Multiple Heat Applications for Developing Countries”, Hindawi Publishing Corporation, *International Journal of Nuclear Energy*, Volume 2013, Article ID 918567, 18 pages, <http://dx.doi.org/10.1155/2013/918567>, 2013.
5. ANDREW C. KADAK, “The status of The US High Temperature Gas Reactor”, *Engineering 2* (2016), hal 119 – 123, <http://dx.doi.org/10.1016/J.ENG.2016.01.026>.
6. K. VERFONDERN, et.al. , “Safety Concept of Nuclear Cogeneration of Hydrogen and Electricity”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 42, Issue 11, (2017), 7551 – 7559.
7. HIROYUKI SATO, et.al., “Safety Design Consideration for HTGR Coupling with Hydrogen Production Plant”, *Progress in Nuclear Energy* 82 (2015) 46 – 52.
8. BECK, J.M. and PINCOCK, L.F., “High Temperature Gas-Cooled Reactors Lessons Learned Applicable to the Next Generation Nuclear Plant”, Prepared for the U.S. Department of Energy Office of Nuclear Energy, USA, 2011.
9. MICHAEL G. KELLAR., “Next Generation Nuclear Plant Business Models for Industrial Process Heat Applications”, Technical and Economic assessment of Non Electric Applications of Nuclear, NEA/IAEA Expert Workshop France, April 6, 2013.
10. PIENKOWSKI, L., “HTR Reactors for Indutry Perspectives of Nuclear Cogeneration”, *Generation IV Reactors*, Warsaw University of Technology, 25 May 2011.
11. PHILLIPM. MILLS, et.al., “End User Functional and performance Requirements HTGR Energy Supply to Industrial Processes”, U.S. Department of Energy, Office of Nuclear Energy, Idaho, September, 2010.
12. JOSEPH KONEFAL, et al., “Survey of HTGR Process Energy Appications”, NGNP Project, May 2008.
13. V. KLIMOVA, et.al., “On the Problem of Efficient Production of Hydrogen Reducing Gases for Metallurgy Utilizing Nuclear Energy”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 41, Issue 5, (2016), hal. 3320 – 3325. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.12.148>.
14. KEMENTRIAN PERINDUSTRIAN, *Kawasan Industri Indonesia*, Media Kajian dan Informasi Tata Ruang Indonesia, September 2013.
15. Bidang PKT PLTN, PPTN, “Survei Tapak di Banten Tapak Penapisan-2”, Laporan Ahir Kegiatan Survei Tapak , Januari – Desember 2010.
16. TSINGHUA UNIVERSITY, “High Temperature Gas Cooled Reactor - Pebble-Bed Module”, Status report 96-HTGR-Pebble-Bed Module (HTR-PM), International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 2011.
17. WON JAE LEE, et.al., “Perspectives of Nuclear Heat and Hydrogen”, *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 41. No. 4., May 2009.

18. ERLAN DEWITA, SITI ALIMAH, "Analisis Kinerja Bahan bakar Reaktor Tipe HTGR Sebagai Penghalang Produk Fisi", *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, volume 19, No.1, Juni 2017.
19. KADAK, A. C., "High Temperature Gas Reactors", Massachusetts Institute of Technology, Kadak Associates, [web.mit.edu/pebble-bed/Presentation/HTGR.pdf](http://web.mit.edu/pebble-bed/Presentation/HTGR.pdf), diakses Oktober 2013.
20. SITI ALIMAH, dkk, "Analisis Komparasi HTGR Tipe Prismatic dan Pebble Bed", *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, Volume 16, Nomor 1, 2014.
21. MAJUMDAR, D., "Desalination and Other Non Electric Applications of Nuclear Energy", Workshop and Nuclear Reaction Data and Nuclear Reactors: Physics, Design and Safety Trieste, 25 February-28 March, 2002.
22. ERLAN DEWITA, DEDY PRIAMBODO, SITI ALIMAH, "Sistem Kopling PLTN Tipe HTGR dengan Instalasi Produksi Hidrogen", *Prosiding Seminar Nasional Pengembangan Energi Nuklir IV*, 2011.
23. CROSBIE, L.M., et.all., "Hydrogen Production by Nuclear Heat", GENES4/ANP, Japan, 2003.
24. SITI ALIMAH, SRIYONO, "Kajian penentuan Jarak aman Instalasi Produksi Hidrogen dengan Reaktor RGTT200K, *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir* Vo. 15, No.1, 2013.
25. SITI ALIMAH, dkk., "Aspek Termodinamika Produksi Hidrogen Dengan Proses Steam Reforming Gas Alam", *Majalah Ilmiah Pengkajian Industri*, BPPT, Volume 4 Nomor 1, April 2010.
26. PHILLIP MILLS., et.all., "High Temperature Gas-Cooled Reactor projected Market and Preliminary Economic", U.S. Department of Energy, August 2010.
27. BANTEN MINING AND ENERGY, Ketenagalistrikan, <http://bantenmining.wordpress.com/ketenagalistrikan/> diakses tanggal 19 Februari 2014.
28. XING L. YAN, et.al., "Study of a Nuclear Energy Supplied Steel Making System for Near-Term Application", *Journal Energy* 39 (2012) 154 - 165, doi:10.1016/j.energy.2012.01.047.
29. KEMENTERIAN PERINDUSTRIAN, "Potret Penggunaan Energi dan Produksi Emisi di Industri Baja dan Industri Pulp-Kertas", Laporan Akhir Implementation of Energy Conservation and CO<sub>2</sub> Emission Reduction in Industrial Sector (Phase 1), 2011.
30. CHANDRA ASRI PETROCHEMICAL, "Agenda : Public Expose 2017", 25 tahun Berkembang PT. Chandra Asri Petrochemical, 6 November 2017.
31. ARROSSY FANNYMIA K.P., dkk., "Laporan Kuliah Lapangan PT. Chandra Asri Petrochemical, Tbk.", Program Studi S1 Teknik Kimia, Fakultas Teknik Industri, UPN Veteran, Yogyakarta, 2017.
32. ...., [Http://www.mitsubishichemical.co.id/](http://www.mitsubishichemical.co.id/), diakses 11 Mei 2018.
33. ...., Lecture 6 "DMT And Terephthalic Acid, Polyester, PET Resin, PBT Resin", Course Chemical Technology (Organic) Module VIII, <http://nptel.ac.in/courses/103107082/module8/lecture6/lecture6.pdf>, di akses 11 Mei 2018.
34. PT. NS BlueScope Indonesia, <http://www.bluescope.co.id/about/our-history-id/#>
35. PT. Krakatau Wajatama, <http://www.krakatauwajatama.co.id/>
36. PT. Cabot Chemical, <https://m2indonesia.com/informasi/perusahaan/profil-perusahaan-cabot-chemical-pt-cilegon-provinsi-banten.htm>
37. PT. Dover Chemical, <http://dovechem.co.id/en> diakses tanggal 21 Mei 2018.
38. [https://en.wikipedia.org/wiki/Polyvinyl\\_chloride#Thermal\\_and\\_fire](https://en.wikipedia.org/wiki/Polyvinyl_chloride#Thermal_and_fire), diakses tgl 6 Maret 2018.
39. INEOS Olefins & Polimers USA, Polypropylene Processing Guide. [https://www.ineos.com/globalassets/ineos-group/businesses/ineos-olefins-and-polymers-usa/products/technical-information--patents/ineos\\_polypropylene\\_processing\\_guide.pdf](https://www.ineos.com/globalassets/ineos-group/businesses/ineos-olefins-and-polymers-usa/products/technical-information--patents/ineos_polypropylene_processing_guide.pdf), diakses pada tanggal 30 Januari 2018.
40. LYUSBLOG, "Pentingnya Captive Power bagi Indonesia", <https://lyusblog.wordpress.com/2016/06/13/pentingnya-captive-power-bagi-indonesia/>.
41. PT. KRAKATAU DAYA LISTRIK, "Introduction from President Director", <http://www.kdl.co.id/about/introduction> diakses pada tanggal 15 Oktober 2018
42. <http://nasional.kompas.com/read/2016/06/10/08403321/hari.ini.jokowi.kunjungi.lokasi.pt.u.lontar.banten>, diakses 22 September 2017.
43. PT. KRAKATAU DAYA LISTRIK, Energy Solution, <http://www.kdl.co.id/?page=content&cid=17>, diakses pada tanggal 17 Maret 2014.

44. Genting Group, "Genting Energy" diunduh tanggal 1 Desember 2018, [www.genting.com/energy/](http://www.genting.com/energy/).

**DISKUSI/TANYA JAWAB :**

1. **PERTANYAAN :**  
Mengapa memilih PLTN HTGR ?

**JAWABAN :**

Dalam studi ini PLTN HTGR dipilih karena energi panas HTGR dapat dimanfaatkan untuk industri yang membutuhkan temperatur tinggi dibawah 950°C.

2. **PERTANYAAN :**  
Apakah HTGR sudah mencapai suhu 1680°C ?  
Apakah panas dari HTGR bisa mencukupi kebutuhan panas di PT. Krakatau Steel (50 - 1680°C) ?

**JAWABAN :**

Panas HTGR tidak mencapai suhu 1680°C. Panas HTGR dapat dimanfaatkan untuk jangkauan temperatur dibawah 950°C. Energi yang diperlukan oleh PT Krakatau Steel adalah energi panas dan listrik. Energi panas dengan temperatur di bawah 950°C, seperti di proses reduksi bertemperatur 935°C di unit Gas heater dapat dipasok dari HTGR, sedangkan untuk temperatur peleburan sekitar 1680°C dengan electric Arc Furnace melalui suatu elemen resistansi berupa elektroda dari carbón atau graphite pada furnace, kemudian terbentuk percikan bunga api listrik antara logam yang akan dilebur dengan elektroda tersebut.

Halaman ini sengaja di kosongkan

## POTENSI INDUSTRI INTERNASIONAL DALAM MEMASOK KOMPONEN BAGIAN NUKLIR PEMBANGUNAN REAKTOR DAYA EKSPERIMENTAL (RDE) DI INDONESIA

Moch. Djoko Birmano<sup>1</sup>, Arief Tris Yuliyanto<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Pusat Kajian Sistem Energi Nuklir (PKSEN) - BATAN, Jl. Kuningan Barat, Mp. Prapatan,  
Jakarta Selatan 12710

email: [birmano@batan.go.id](mailto:birmano@batan.go.id)

### ABSTRAK

#### POTENSI INDUSTRI INTERNASIONAL DALAM MEMASOK KOMPONEN BAGIAN NUKLIR PEMBANGUNAN REAKTOR DAYA EKSPERIMENTAL (RDE) DI INDONESIA.

Saat ini Pemerintah Indonesia sedang berencana membangun Reaktor Daya Eksperimental (RDE), yaitu reaktor nuklir berbasis teknologi HTGR. Banyak hal yang harus dipersiapkan guna menyongsong pembangunan RDE di Indonesia, salah satunya adalah aspek kesiapan industri, baik nasional maupun internasional. Keterlibatan industri (industrial involvement) merupakan salah satu infrastruktur dasar pembangunan PLTN. Pembangunan RDE banyak melibatkan industri komponen baik nasional maupun internasional yang mencakup industri jasa konstruksi sipil, industri mekanikal, industri elektrikal dan industri jasa rekayasa arsitek. Sistem RDE dilihat dari komponennya dibedakan menjadi 2 bagian, yaitu bagian nuklir (Nuclear Island, NI) dan bagian non-nuklir/konvensional (conventional island). Untuk komponen bagian konvensional, industri nasional sudah banyak berpengalaman dalam manufaktur dan memasok komponen dalam pembangunan pembangkit konvensional di Indonesia. Sementara untuk komponen bagian nuklir, industri nasional belum berpengalaman dalam manufaktur, sehingga industri internasional yang akan memasok. China dan Jepang adalah 2 (dua) negara diantara sedikit negara yang berpengalaman dalam membangun HTGR. China sudah membangun HTR-10 dan HTR-PM, sedangkan Jepang membangun HTTR. Dari pengalaman mereka membangun HTGR dapat diketahui industri komponen nuklir yang terlibat. Tujuan dari kajian ini adalah untuk mengetahui dan menganalisis potensi kemampuan industri internasional untuk berpartisipasi dalam pembangunan RDE di Indonesia. Metode yang digunakan adalah kajian pustaka terkait industri internasional yang berpengalaman dalam manufaktur dan memasok komponen bagian nuklir dalam pembangunan PLTN berbasis teknologi HTGR, yang selanjutnya dilakukan analisis deskriptif. Hasil kajian menunjukkan bahwa dalam pembangunan HTR-10 dan HTR-PM, The Shanghai Electric Corporation, Dongfang Electric Corporation dan Harbin Electric Corporation diberi kewenangan manufaktur dan memasok komponen sistem penyedia uap nuklir (SPUN). Sementara itu, Mitsubishi Heavy Industries (MHI), Fuji Electric, Toshiba, Hitachi, Nuclear Fuel Industries (NFI) and Toyo Tanso telah berpartisipasi dalam proyek HTTR sejak awal dalam mendisain dan memasok peralatan & komponen. Industri yang terlibat dalam pembangunan HTR-10, HTR-PM dan HTTR tersebut berpotensi untuk dilibatkan dalam pembangunan RDE di Indonesia. Belajar dari pengalaman China dan Jepang membangun HTR-10, HTR-PM dan HTTR, BATAN sebaiknya sudah melibatkan industri-industri tersebut sejak awal mendisain komponen RDE hingga memasok komponen tersebut ketika konstruksinya.

Kata kunci: potensi, industri komponen, bagian nuklir, RDE

### ABSTRACT

**THE POTENCY OF INTERNATIONAL'S INDUSTRY IN SUPPLYING NUCLEAR ISLAND'S COMPONENTS ON THE CONSTRUCTION OF EXPERIMENTAL POWER REACTOR IN INDONESIA.** Currently the Indonesian Government is planning to build an Experimental Power Reactor (EPR), which is a nuclear reactor based on HTGR technology. Many things must be prepared to meet the development of RDE in Indonesia, one of them is the aspect of national industrial readiness, both nationally and internationally. Industrial involvement (industrial involvement) is one of the basic infrastructures for the NPP's construction. EPR's construction involves many national and international component's industries that include civil construction services, mechanical industries, electrical industries and architect engineer (A/E) services industries. The RDE system is seen from its components divided into 2 parts, that is Nuclear Island (NI) and Conventional Island (CI). For CI's components, the national

industries have many experiences in manufacturing and supplying components in the conventional plants's construction in Indonesia. As for the nuclear island's components, the national industries have no experiences in manufacturing, so that the international industries will supply it. China and Japan are 2 (two) countries among a few countries that are experienced in HTGR's construction. China has built HTR-10 and HTR-PM, while Japan has built HTTR. From their experience in building HTGR, it can be known the involvement of component industries in the nuclear island. The purpose of this paper is to find out and analyze the potency of the international industries's ability to participate in the construction of EPR in Indonesia. The method used is a literature study related to international industries that are experienced in manufacturing and supplying nuclear island's components in the construction of HTGR technology-based NPP, which is then carried out by descriptive analysis. The results of the study show that in the construction of the HTR-10 and HTR-PM, The Shanghai Electric Corporation, Dongfang Electric Corporation and Harbin Electric Corporation were given the authority to manufacture and supply components of the nuclear steam supply system (NSSS). Meanwhile, Mitsubishi Heavy Industries (MHI), Fuji Electric, Toshiba, Hitachi, Nuclear Fuel Industries (NFI) and Toyo Tanso have participated in the HTTR project since the beginning in design and supply of equipments & components. The industries involved in the construction of HTR-10, HTR-PM and HTTR have the potency to be involved in the RDE's development in Indonesia. Learning from the experiences of China and Japan to build the HTR-10, HTR-PM and HTTR, BATAN should have involved these industries since the beginning of designing RDE's components until supply the components when constructed it.

Keyword: potency, industries of components, nuclear island, experimental power reactor (EPR)

## PENDAHULUAN

Undang-Undang Nomor 17 Tahun 2007 tentang Rencana Pembangunan Jangka Panjang Nasional [1], Peraturan Pemerintah Nomor 14 Tahun 2015 tentang Rencana Induk Pengembangan Industri Nasional 2015-2019 [2], dan Peraturan Presiden Nomor 2 Tahun 2015 tentang Rencana Pembangunan Jangka Menengah (RPJMN) Tahun 2015-2019 [3] telah mengamanatkan pemanfaatan energi nuklir pada RPJMN III (2015-2019) dengan mempertimbangkan faktor keselamatan secara ketat. Terkait dengan upaya untuk merealisasikan amanat tersebut dan sesuai dengan tugas BATAN sebagai lembaga penelitian dan pengembangan energi nuklir, maka saat ini BATAN sedang merencanakan pembangunan **Reaktor Daya Eksperimental (RDE)** yang bersifat non-komersial [4-7]. Berdasarkan Undang-Undang Nomor 10 Tahun 1997 tentang Ketenaganukliran [8] dan Peraturan Pemerintah Nomor 2 Tahun 2014 tentang Perizinan Instalasi Nuklir dan Pemanfaatan Bahan Nuklir [9], BATAN mempunyai wewenang dalam pembangunan, pengoperasian dan dekomisioning reaktor nuklir non komersial.

Saat ini Pemerintah Indonesia sedang berencana membangun Reaktor Daya Eksperimental (RDE), yaitu reaktor nuklir berbasis teknologi HTGR. **RDE adalah Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) yang termasuk dalam reaktor nuklir kapasitas kecil dan menengah (Small Medium Reactor, SMR)** berkapasitas 10 MWth yang rencananya akan dibangun di Kawasan Nuklir Serpong (KNS) – Puspiptek, Tangerang Selatan, Banten [4-7]. Dalam pembangunan RDE dipilih teknologi jenis **Pebble Bed Reactor (PBR)**, yang termasuk dalam reaktor berpendingin gas temperature tinggi (*High Temperature Gas-cooled Reactor, HTGR*) [10]. Reaktor bertemperatur tinggi jenis PBR merupakan salah satu desain reaktor nuklir yang sangat menarik dengan pertimbangan sangat aman, mempunyai fleksibilitas bahan bakar, telah teruji, harga kompetitif, multiguna, dapat dikembangkan di seluruh wilayah Indonesia sesuai kebutuhannya. HTGR sangat cocok untuk memenuhi kebutuhan penyediaan listrik dan panas industri atau berfungsi untuk kogenerasi [11-24]. Dari sisi keselamatan, sistem keselamatan pasif dari desain PBR menjamin lepasan radiasi yang sangat minimum terhadap lingkungan dalam kondisi apapun termasuk kondisi parah seperti yang dialami pada kecelakaan Fukushima. Desain PBR memiliki sistem keselamatan pasif yang hanya bergantung pada mekanisme alamiah sehingga sistem teras reaktornya menjadi sangat sederhana apabila dibandingkan dengan sistem reaktor nuklir yang komersial saat ini.

Maksud pembangunan RDE adalah untuk membawa Indonesia menjadi penyedia teknologi (*technology provider*) [25] terkait penyediaan energi listrik dan panas tinggi guna

menopang kebutuhan industri nasional, serta menjadi unggul di kawasan regional. Dalam jangka panjang, RDE merupakan *milestone* dari penguasaan teknologi PLTN komersial berbasis RDE yang disebut **Pembangkit Listrik dan Uap Panas Industri (PeLUit)**.

Banyak hal yang harus dipersiapkan guna menyongsong pembangunan RDE di Indonesia, salah satunya adalah aspek kesiapan industri, baik nasional maupun internasional. Keterlibatan industri (*industrial involvement*) merupakan salah satu infrastruktur dasar pembangunan PLTN [26-27]. Pembangunan RDE banyak melibatkan industri komponen baik nasional maupun internasional yang mencakup industri jasa konstruksi sipil, industri mekanikal dan industri elektrikal. Sistem RDE dilihat dari komponennya dibedakan menjadi 2 bagian, yaitu komponen bagian nuklir (*Nuclear Island, NI*) dan komponen bagian non-nuklir/konvensional (*Conventional Island, CI*). Untuk komponen bagian konvensional, industri nasional sudah banyak berpengalaman dalam manufaktur dan memasok komponen dalam pembangunan pembangkit konvensional di Indonesia [28]. Sementara untuk komponen bagian nuklir, industri nasional belum berpengalaman dalam manufaktur, sehingga industri internasional yang akan memasok. China dan Jepang adalah 2 (dua) negara diantara sedikit negara yang berpengalaman dalam membangun HTGR [29-35]. China sudah membangun HTR-10 (High Temperature Reactor, 10 MWt) dan HTR-PM (*High Temperature Reactor - Pebble bed Module*) [29-34], sedangkan Jepang membangun HTTR (*High Temperature engineering Test Reactor*) [35,36]. Dua reaktor riset HTGR yang sampai saat ini ada dan bisa dioperasikan adalah HTR-10 jenis *pebble bed* di China dan HTTR jenis *prismatic* di Jepang. Dari pengalaman mereka membangun HTGR dapat diketahui industri komponen di bagian nuklir yang terlibat.

Tujuan dari kajian ini adalah untuk mengetahui dan menganalisis potensi kemampuan industri internasional untuk berpartisipasi dalam pembangunan RDE. Metode yang digunakan adalah kajian pustaka, yang selanjutnya dilakukan analisis deskriptif. Kajian yang telah dilakukan sebelumnya terkait RDE, diantaranya adalah perizinan RDE di Indonesia[4], kebutuhan SDM RDE tahap implementasi proyek[5], tata ruang pembangunan RDE[6] dan proses perizinan tapak RDE[7].

Kajian ini penting untuk dilakukan karena merupakan bagian dari kegiatan penyiapan salah satu infrastruktur dasar pembangunan PLTN, yaitu keterlibatan industri (*industrial involvement*).

## METODOLOGI

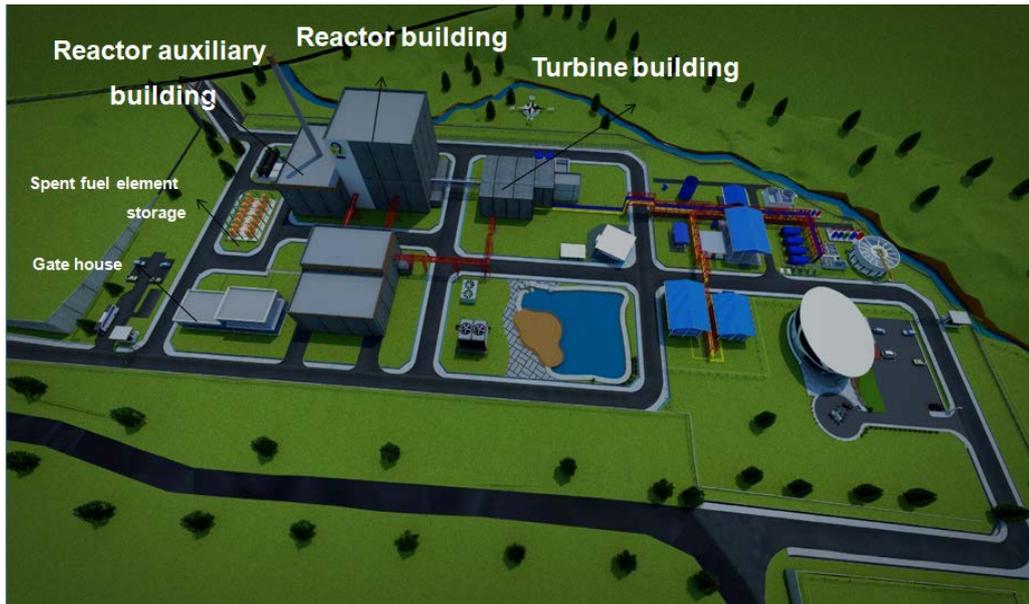
Metode yang digunakan adalah kajian pustaka, dan selanjutnya dilakukan analisis deskriptif. Penyusunan makalah ini dilakukan dengan tahapan sebagai berikut:

1. Breakdown komponen RDE di bagian nuklir
2. Identifikasi industri komponen yang telah berpartisipasi memasok komponen di bagian nuklir dalam pembangunan pembangkit HTGR
3. Identifikasi industri komponen yang berpotensi memasok komponen di bagian nuklir dalam pembangunan RDE
4. Analisis

## HASIL DAN PEMBAHASAN

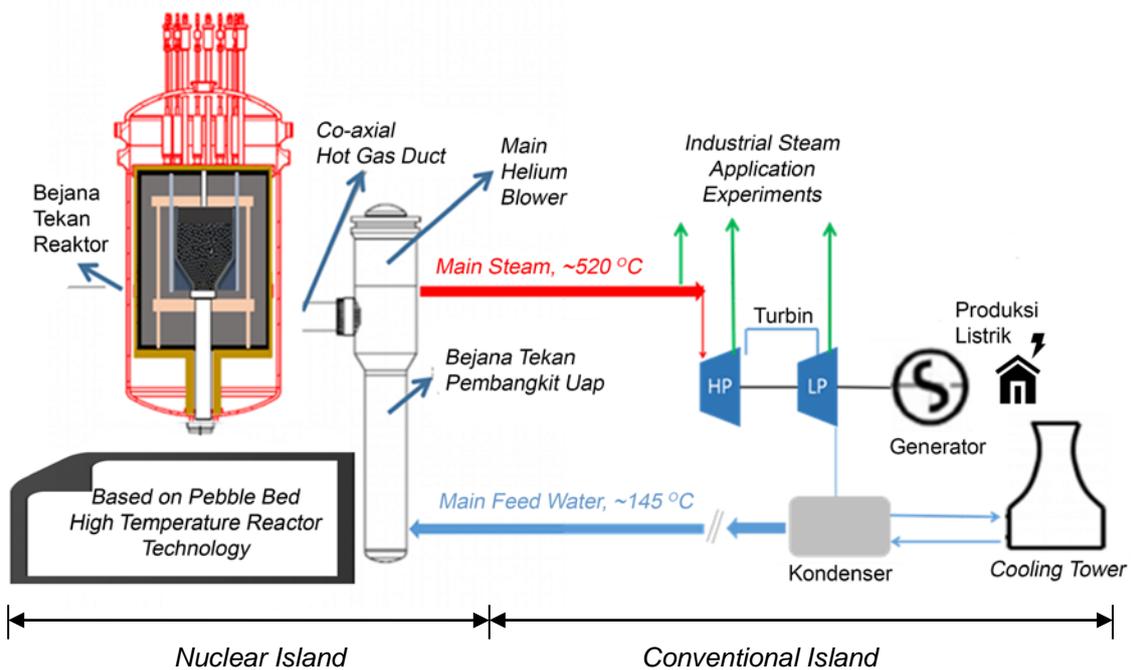
### Sistem RDE dan *Breakdown* Komponen RDE

Tata letak sistem RDE secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 1. Sistem RDE terdiri dari dua (2) bangunan utama, yaitu bangunan reaktor (*reactor building*) dan bangunan turbin (*turbine building*). Bangunan reaktor berisi sistem, struktur dan komponen (SSK) untuk bagian nuklir seperti *reactor pressure vessel*, *main helium circulator*, *steam generator*, *hot gas duct*, *reactor internals*. Sementara bangunan turbin berisi SSK untuk bagian non nuklir atau konvensional, seperti turbin, generator, kondenser dan lain-lain.



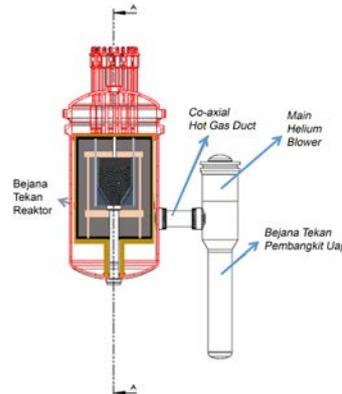
Gambar 1. Tata Letak Sistem RDE

Skema umum dari sistem RDE ditunjukkan pada Gambar 2 [37]. Sistem RDE dilihat dari komponennya dibedakan menjadi 2 bagian, yaitu bagian nuklir dan bagian non-nuklir. Bagian non nuklir juga sering disebut bagian konvensional atau bagian turbin dan generator (*Turbine/Generator (T/G) Island*).



Gambar 2. Skema Umum Sistem RDE [37]

Skema umum RDE bagian nuklir ditunjukkan pada Gambar 3. Komponen utama dari sistem RDE bagian nuklir antara lain adalah 1). Reactor Pressure Vessel Unit, 2). Main helium circulator, 3). Steam generator, 4). Hot gas duct, 5). Reactor internals.



Gambar 3. Skema Umum RDE Bagian Nuklir

### Pengalaman Industri Internasional Dalam Pembangunan HTGR di Dunia

China dan Jepang adalah 2 (dua) negara diantara sedikit negara yang berpengalaman mendisain, mengembangkan dan membangun reaktor nuklir tipe HTGR. China sudah membangun HTR-10 dan HTR-PM, sedangkan Jepang membangun HTTR. Dua reaktor riset HTGR yang sampai saat ini masih ada dan bisa dioperasikan adalah HTR-10 (*High Temperature Reactor-10*) jenis *pebble bed* dan HTTR (*High Temperature engineering Test Reactor*) jenis *prismatic*. Dari pengalaman mereka membangun HTGR dapat diketahui industri komponen di bagian nuklir yang terlibat.

### Pengalaman Industri dalam Pembangunan HTR-10 dan HTR-PM di China

Keterlibatan industri manufaktur & pemasok komponen utama dan bahan bakar dalam pembangunan HTR-10 dan HTR-PM di China ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Pengalaman Industri Manufaktur & Pemasok Komponen Utama dan Bahan Bakar dalam Pembangunan HTGR di China [30,34,38]

No.	Perusahaan	Produk	Pengalaman
1	Shanghai Electric Corporation	RPV, SGPV, SG, internal reaktor, steel containment vessel (SCV)	- Komponen bagian nuklir HTR-10 - RPV dan internal reaktor HTR-PM
2	Dongfang Electric Corporation	RPV, turbin, SG, Evaporator, desalination plant (MED, RO)	SG HTR-PM
3	Harbin Electric Corporation	SG, pompa, turbin, condenser, generator	SG HTR-PM
4	China North Nuclear Fuel (CNNF)	<i>spherical fuel elements</i>	Elemen BBN untuk HTGR China
5	Toyo Tanso	- komponen grafit teras - blok grafit isotropic - blok bahan bakar - blok pemandu batang kendali - blok reflector - tiang pendukung - kursi tiang - penyerap neutron - boron-karbida/grafit.	memasok komponen grafit teras dll untuk HTR-PM

### Industri Manufaktur dan Pemasok Komponen Utama

Komponen utama HTR-10 dan HTR-PM diantaranya adalah *reactor pressure vessel (RPV)*, *steam generator pressure vessel (SGPV)*, *steam generator (SG)*, *hot gas duct pressure vessel*, *reactor internal structure*, *control rod* dan *helium circulator*.

HTR-10 adalah reaktor purwarupa (*prototype plant*) tipe *Pebble Bed* berkapasitas 10 MWt yang dikembangkan oleh Institute of Nuclear and New Energy Technology (INET), Tsinghua University di China. Konstruksi dimulai pada tahun 1995, mencapai kekritisan yang pertama pada bulan Desember 2000, dan dioperasikan dalam kondisi daya penuh pada bulan Januari 2003. HTR-10 dimodelkan dari HTR-MODUL Jerman. Komponen-komponen HTR-10 ini semuanya dibuat oleh berbagai industri di Shanghai, China, diantaranya adalah Shanghai Electric Corporation (SEC).

HTR-PM adalah reaktor demonstrasi (*demo plant*) yang berkapasitas 2x250MWt. Dalam pembangunan HTR-PM, dukungan Pemerintah sangat penting untuk kelangsungan proyek HTR-PM. Hal ini ditunjukkan dengan menunjuk Chinergy Co. Ltd. sebagai arsitek enjiner (A/E) dan kontraktor EPC bagian nuklir, INET - Tsinghua university sebagai litbang & disainer komponen-komponen kunci dan Huaneng Shandong Shidao Bay Nuclear Power Co. (HSNPC) sebagai pemilik. Konstruksi dimulai pada tahun 2008 penyiapan tapak, *first concrete* Desember 2012 dan 2017 selesai konstruksi. Shanghai Electric Corporation (SEC), Dongfang Electric Corporation (DEC) dan Harbin Electric Corporation (HEC) diberi wewenang memproduksi dan memasok komponen-komponen utama bagian nuklir atau Sistem Penyedia Uap Nuklir (SPUN). Pada tahun 2008, kontrak manufaktur untuk RPV, pembangkit uap, internal reaktor metalik, *blower* helium utama, dan lain-lain ditandatangani. RPV dan internal reaktor metalik diproduksi oleh Shanghai Electric Corporation (SEC). Manfaat dari pembangunan industri manufaktur tenaga nuklir di China, mereka memiliki kemampuan untuk memproduksi RPV dan internal reaktor metalik untuk ukuran besar. Gambar 4 menunjukkan status RPV HTR-PM pada bulan September 2015.



Gambar 4. Pembuatan RPV HTR-PM oleh SEC [34]

Pembangkit uap adalah peralatan yang paling sulit memproduksi dalam banyak aspeknya, termasuk materialnya, menggulung dan membengkokkan tabung pemindahan panas, merakit unit transfer panas, perakitan akhir, pengelasan, jadwal produksi, *tool* dan *workshop* khusus. Pembangkit uap HTR-PM dibuat bersama antara Shanghai Electric Corporation (SEC), Dongfang Electric Corporation (DEC) dan Harbin Electric Corporation (HEC).

Selain membuat dan memasok komponen utama bagian nuklir HTGR, tiga BUMN China ini juga berpengalaman membuat dan memasok komponen utama PWR seperti RPV, SG dan *pressurizer* untuk PLTN Sanmen 1&2 dan Haiyang 1&2. Tiga perusahaan BUMN ini, bersama dengan berbagai anak perusahaan mereka mendominasi manufaktur dan pasokan komponen mekanik pembangkit listrik di China [30].

#### *Industri Manufaktur dan Pemasok Bahan Bakar*

Bahan bakar nuklir untuk HTR-10 dan HTR-PM yang termasuk jenis *Pebble Bed Reactor (PBR)* adalah elemen bahan bakar berbentuk bola (*spherical fuel elements*).

China North Nuclear Fuel Co. Ltd. (CNNF) yang dibangun pada tahun 1958, adalah pusat penelitian dan produksi utama bahan nuklir, elemen bahan bakar nuklir di China, yang dimiliki oleh China National Nuclear Corporation (CNNC). CNNF terletak di Baotou, Inner Mongolia, Provinsi Qinshan, China memberikan kontribusi penting untuk penggunaan energi nuklir di China. CNNF adalah produsen bahan bakar nuklir terkemuka yang memproduksi hampir semua jenis bahan bakar nuklir di China dan menyediakan layanan yang terkait dengan bahan bakar PLTN. Fasilitas CNNF terdiri dari lembaga litbang bahan nuklir dan bahan bakar nuklir, jalur produksi elemen bakar nuklir, jalur produksi konversi uranium dan pusat inspeksi independen. CNNF memasok elemen bahan bakar nuklir untuk PWR dan PHWR dan sebagian besar reaktor riset di China sekarang dan akan memasok bahan bakar nuklir untuk pembangkit listrik PWR AP1000 dan HTGR.

Jalur produksi pertama di dunia untuk elemen bakar HTGR telah mulai diproduksi massal oleh CNNF. Produksi perdana dimulai sejak Maret 2013 yang akan diperuntukkan untuk bahan bakar HTR-PM yang dimiliki oleh Huaneng Shandong Shidao Bay Nuclear Power Company (HSNPC). Pabrik elemen bahan bakar berbentuk bola (*spherical fuel elements*) HTR-PM dirancang dengan kapasitas produksi 300.000 elemen per tahun. Teknologi dan peralatan pembuatan pabrik bahan bakar bola ini didasarkan pada keberhasilan INET-Tsinghua University dalam pembuatan bahan bakar HTR-10, dan kemudian memproduksinya dalam skala besar.

### ***Pengalaman Industri dalam Pembangunan HTTR di Jepang***

Keterlibatan industri manufaktur & pemasok komponen utama dan bahan bakar dalam pembangunan HTTR di Jepang ditunjukkan pada Tabel 2.

#### ***Industri Manufaktur dan Pemasok Komponen Utama***

Penelitian dan pengembangan HTGR telah dilakukan oleh Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) sejak 1960-an. Dari hasil litbang HTGR tersebut dihasilkan HTTR, yaitu reaktor nuklir tipe HTGR prismatic berkapasitas 30 MWt. Pembangunan HTTR dimulai Maret 1991 dan mulai beroperasi pada 1998 [39]. Pembangunan dan pengoperasian HTTR dilakukan oleh Japan Atomic Energy Agency (JAEA) Jepang. Pembangunan HTTR bertujuan membentuk dan memajukan teknologi HTGR dasar, serta menerapkan penelitian lanjutan tentang HTGR. HTTR berkapasitas 30 MWt telah beroperasi dengan sukses dengan suhu tertinggi di dunia saat ini yaitu sebesar 950 °C.

Keterlibatan industri Jepang termasuk Toshiba, Mitsubishi Heavy Industries (MHI), Fuji Electric, Hitachi, Ishikawajima-Harima Heavy Industries (IHI), Nuclear Fuel Industries (NFI), Toyo Tanso, dan industri lainnya telah sejak lama mengembangkan HTGR bersama-sama dengan Japan Atomic Energy Agency (JAEA) [35]. Keterlibatan industri Jepang ini sudah dimulai sejak awal dalam mendisain peralatan dan komponen temperatur tinggi, sistem dan keselamatan HTTR. Kerjasama industri dengan JAEA tersebut memuncak dalam konstruksi HTTR di Pusat Penelitian dan Pengembangan JAEA di Oarai, Jepang [39], diantaranya dengan memasok komponen dan peralatan HTTR selama konstruksi.

Pada tahun 1992, Nuclear Fuel Industries Ltd. (NFI) mulai mengoperasikan pabrik bahan bakar HTR di Tokai. Ini adalah salah satu pabrik bahan bakar HTGR di dunia yang memproduksi secara massal yang ada saat ini, selain pabrik bahan bakar China North Nuclear Fuel Co. Ltd. (CNNF) milik China National Nuclear Corporation (CNNC) di Baotou City, inner Mongolia, China [38-39]. Sejak awal 1970-an ketika studi tentang bahan bakar HTGR dimulai, banyak teknologi fabrikasi bahan bakar telah dikembangkan dan didirikan oleh NFI. Kinerja bahan bakar dievaluasi dan ditunjukkan melalui program penelitian dan pengembangan. Berdasarkan teknologi ini, NFI berhasil memfabrikasi *first loading* bahan bakar HTTR dari Juni 1995 hingga Desember 1997. Fabrikasi bahan bakar HTTR terutama terdiri dari kernel, partikel bahan bakar berlapis, kompak bahan bakar annular, batang bahan bakar dan proses perakitan bahan bakar.

Dalam pembangunan HTTR, ruang lingkup Hitachi adalah desain, manufaktur, dan pemasangan komponen-komponen utama seperti bejana tekan reaktor, bejana sistem pendingin dan sistem air pendingin tambahan [35]. Selain itu, Hitachi banyak terlibat dalam banyak proyek ABWR di Jepang [40].

Toshiba dan IHI memainkan peran sebagai perusahaan manufaktur dan pemasok komponen-komponen seperti intermediate heat exchanger (IHX), instrumentasi dan kontrol (I&C) dan struktur reaktor tambahan.

Fuji Electric telah berpartisipasi dalam desain, pengembangan dan konstruksi HTTR, HTGR pertama di Jepang, dan sekarang melakukan penelitian dan pengembangan pada HTGR komersial. Selain itu, Fuji Electric memasok peralatan dan komponen utama seperti internal reaktor, penanganan bahan bakar dan fasilitas penyimpanan dan sistem pemantauan radiasi dan seterusnya. Internal reaktor dari HTTR terdiri dari struktur pendukung inti grafit, dukungan inti logam struktur dan blok perisai.

**Tabel 2.** Pengalaman Industri Manufaktur&Pemasok Komponen Utama dan Bahan Bakar dalam Pembangunan HTGR di Jepang [35,36]

No.	Perusahaan	Produk	Pengalaman
1	Nuclear Fuel Industries (NFI)	bahan bakar HTGR prismatic	Fabrikasi bahan bakar HTTR, Oarai, Jepang
2	Hitachi	Komponen-komponen utama: - bejana tekan reaktor - bejana sistem pendingin - sistem air pendingin tambahan	Desain, manufaktur dan pemasangan RPV dan sistem pendingin HTTR
3	Toshiba	- Komponen IHX - I&C - struktur reaktor - turbin uap	Disain, manufaktur dan memasok komponen HTTR
4	Ishikawajima-Harima Heavy Industries (IHI)	- Komponen IHX - I&C - struktur reaktor - turbin uap	Disain, manufaktur dan memasok komponen HTTR
5	Fuji Electric	Internal reaktor	- Disain, pengembangan dan konstruksi HTTR - Pemasok peralatan dan komponen internal reaktor HTTR
6	Mitsubishi Heavy Industries (MHI)	- <i>reactor containment vessel</i> - sistem pendingin utama - <i>He circulator</i>	Desain, manufaktur dan instalasi peralatan utama seperti <i>reactor containment vessel</i> dan sistem pendingin utama HTTR
7	Toyo Tanso	- komponen grafit teras - blok grafit isotropik - blok bahan bakar - blok pemandu batang kendali - blok reflector - tiang pendukung - kursi tiang - penyerap neutron - boron-karbida/grafit.	memasok komponen grafit teras dll untuk HTTR

MHI bertanggung jawab atas desain, manufaktur dan instalasi peralatan utama seperti *reactor containment vessel* dan sistem pendingin utama termasuk sirkulator helium untuk HTTR. MHI melakukan penyesuaian total desain, dan mempromosikan konstruksi HTTR dengan mengorganisasikan diantara industri fabrikator HTTR.

#### *Industri Manufaktur dan Pemasok Bahan Bakar*

Bahan grafit digunakan untuk komponen teras HTGR. Toyo Tanso mampu menyediakan komponen grafit teras HTGR yang memenuhi persyaratan HTTR. Toyo Tanso berhasil memproduksi blok grafit isotropik berukuran besar, dan mengembangkan butiran grafit IG-110 isotropik yang halus. Grafit IG-110, grafit isotropik halus, dengan kekuatan

tinggi dan ketahanan oksidasi tinggi digunakan dalam HTTR Jepang dan HTR-PM di China. Komponen grafit berkualitas tinggi berkontribusi besar terhadap kinerja HTTR. Toyo Tanso telah memasok komponen grafit teras (*core graphite components*), blok bahan bakar (*fuel block*), blok pemandu batang kendali (*control rod guide blocks*), blok reflector (*replaceable reflector blocks*), tiang pendukung (*support posts*) dan kursi tiang (*posts seats*). Selain itu, Toyo Tanso juga memproduksi penyerap neutron (*neutron absorber*) dan boron-karbida/grafit.

### Potensi Industri Internasional Dalam pembangunan RDE

Untuk komponen bagian konvensional RDE, industri nasional sudah banyak berpengalaman dalam manufaktur dan memasok komponen dalam pembangunan pembangkit konvensional di Indonesia[28]. Sementara untuk komponen bagian nuklir RDE, industri nasional belum berpengalaman dalam manufaktur, sehingga industri internasional yang akan memasok. China dan Jepang adalah 2 (dua) negara yang berpengalaman dalam membangun HTGR, dimana China sudah membangun HTR-10 dan HTR-PM, sedangkan Jepang membangun HTTR. Dari pengalaman mereka membangun HTGR dapat diketahui industri komponen nuklir yang terlibat. Industri yang terlibat pembangunan HTR-10, HTR-PM dan HTTR tersebut berpotensi untuk dilibatkan dalam pembangunan RDE di Indonesia. Tabel 3 menunjukkan industri pembuat dan pemasok komponen nuklir HTGR beserta produknya yang berpotensi dilibatkan dalam pembangunan RDE. Belajar dari pengalaman China dan Jepang membangun HTR-10, HTR-PM dan HTTR, BATAN sebaiknya sudah melibatkan industri-industri tersebut sejak awal mendisain komponen RDE hingga memasok komponen tersebut ketika konstruksinya. Untuk memberikan pengalaman dan meningkatkan kemampuan industri nasional dalam manufaktur komponen bagian nuklir HTGR, industri nasional terkait perlu diajak dan dilibatkan sejak mendisain hingga manufaktur dengan melakukan kerjasama disain dan manufaktur (*joint design and manufacture*) dengan industri internasional tersebut.

Tabel 3. Industri Pembuat dan Pemasok Komponen Nuklir HTGR dan Produknya

No.	Produk Komponen Bagian Nuklir	Industri Pembuat dan Pemasok
1.	<i>Reactor Pressure Vessel (RPV)</i>	- Shanghai Electric Corporation Ltd. - Dongfang Electric Corporation Ltd. - China First Heavy Industries - Hitachi - Ishikawajima-Harima Heavy Industries
2.	<i>Reactor Containment Vessel (RCV)</i>	Mitsubishi Heavy Industries
3.	<i>Helium Circulator</i>	Mitsubishi Heavy Industries
4.	<i>Steam Generator (SG)</i>	- Shanghai Electric Corporation Ltd. - Dongfang Electric Corporation Ltd. - Harbin Electric Corporation Ltd.
5.	<i>Steam Generator Pressure Vessel (SGPV)</i>	- Shanghai Electric Corporation Ltd.
6.	<i>Reactor Internals</i>	- Shanghai Electric Corporation Ltd. - Fuji Electric
7.	<i>Spherical Fuel Elements</i>	China North Nuclear Fuel Ltd.
8.	<i>Core graphite components, isotropic graphite block, fuel block, control rod guide block, reflector block etc.</i>	Toyo Tanso

### KESIMPULAN

Hasil kajian menunjukkan bahwa dalam pembangunan HTR-10 dan HTR-PM di China dan HTTR di Jepang, banyak melibatkan industri manufaktur komponen dan bahan bakar untuk bagian nuklir, utamanya adalah Shanghai Electric Corporation, Dongfang Electric Corporation dan Harbin Electric Corporation, dan China North Nuclear Fuel di China, dan Mitsubishi Heavy Industries (MHI), Ishikawajima-Harima Heavy Industries, Fuji Electric, Toshiba, Hitachi, Nuclear Fuel Industries (NFI) and Toyo Tanso di Jepang. Industri-industri tersebut berpotensi untuk dilibatkan dalam pembangunan RDE di Indonesia. Belajar dari pengalaman China dan Jepang membangun HTR-10, HTR-PM dan HTTR, BATAN

sebaiknya sudah melibatkan industri-industri tersebut sejak awal mendisain komponen RDE hingga memasok komponen tersebut ketika konstruksinya. Untuk memberikan pengalaman dan meningkatkan kemampuan industri nasional dalam manufaktur komponen bagian nuklir HTGR, industri nasional terkait perlu diajak dan dilibatkan sejak mendisain hingga manufaktur dengan melakukan kerjasama disain dan manufaktur (*joint design and manufacture*) dengan industri internasional tersebut.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan terimakasih kepada Kepala Bidang Kajian Infrastruktur dan Tim KPTF PKSEN yang telah memeriksa dan memperbaiki makalah ini.

#### DAFTAR PUSTAKA

1. Undang Undang, "Rencana Pembangunan Jangka Panjang Nasional", Undang-Undang No. 17/2007, Kementerian Hukum dan HAM (2007).
2. Peraturan Pemerintah, "Rencana Induk Pengembangan Industri Nasional 2015-2019", Peraturan Pemerintah No. 14/2015, Kementerian Hukum dan HAM (2015).
3. Peraturan Presiden, "Rencana Pembangunan Jangka Menengah (RPJMN) Tahun 2015-2019", Peraturan Presiden No. 2/2015, Kementerian Hukum dan HAM (2015).
4. BIRMANO M.D., "Perizinan Reaktor Daya Eksperimental (RDE) di Indonesia," Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah – Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir 2015, Pustek Sains dan Teknologi Akselerator – BATAN, 9 – 10 Juni 2015, ISSN 0216 – 3128, pp. 74-81, Yogyakarta (2015).
5. BIRMANO M.D., "Kajian Kebutuhan Sdm Reaktor Daya Eksperimental (RDE) Tahap Implementasi Proyek," Prosiding Seminar Nasional SDM Teknologi Nuklir – STTN BATAN, 15 September 2015, ISSN 1978-0176, pp. 180-189, Yogyakarta (2015).
6. BIRMANO M.D., "Kajian Kesesuaian Tata Ruang Pembangunan Reaktor Daya Eksperimental (RDE)," Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi Nuklir – PSTNT BATAN, 3 Desember 2015, ISSN 1858-3601, pp. 150-157, Bandung (2015).
7. BIRMANO M.D., "Kajian Proses Perizinan Tapak Reaktor Daya Eksperimental (RDE) di Indonesia," Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir 2016, 4-5 Agustus 2016, ISSN: 355-7524, pp. 785-792, Batam (2016).
8. Undang-Undang, "Ketenaganukliran", Undang-undang No. 10/1997, Kementerian Hukum dan HAM (1997).
9. Peraturan Pemerintah, "Perizinan Instalasi Nuklir dan Pemanfaatan Bahan Nuklir", Peraturan Pemerintah No. 2/2014, Kementerian Hukum dan HAM (1997).
10. BATAN, "Justifikasi Teknis Pembangunan Reaktor Daya Eksperimental", DT.001.KRN.2014, Rev. 0, BATAN (2014).
11. ANGULO C. *et.al.*, "EUROPAIRS: The European project on coupling of High Temperature Reactors with industrial processes", *Jurnal Nuclear Engineering and Design*, Vol. 251, pp. 30–37 (2012).
12. KUHR R., "HTR's Role in Process Heat Applications," *Jurnal Nuclear Engineering and Design*, Vol. 238, no.11, pp. 3013–3017 (2008).
13. SCHROEDERS S. *et. al.*, "Energy economic evaluation of solar and nuclear driven steam methane reforming processes," *Jurnal Nuclear Engineering and Design*, Vol. 329, no. April 2017, pp. 234–246 (2018).
14. YAN X. *et. al.*, "A hybrid HTGR system producing electricity, hydrogen and such other products as water demanded in the Middle East," *Jurnal Nuclear Engineering and Design*, Vol. 271, pp. 20–29 (2014).
15. SATO H. *et. al.*, "Safety design consideration for HTGR coupling with hydrogen production plant," *Jurnal Progress in Nuclear Energy*, Vol. 82, pp. 46–52 (2015).
16. VERFONDERN K. *et. al.*, "Safety concept of nuclear cogeneration of hydrogen and electricity," *Jurnal Hydrogen Energy*, Vol. 42, no. 11, pp. 7551–7559 (2017).
17. JASZCZUR M. *et. al.*, "Hydrogen production using high temperature nuclear reactors: Efficiency analysis of a combined cycle," *Jurnal Hydrogen Energy*, Vol. 41, no. 19, pp. 7861–7871 (2016).
18. HITTNER D. *et. al.*, "High and very high temperature reactor research for multipurpose energy applications," *Jurnal Nuclear Engineering and Design*, Vol. 241, pp. 3490–3504 (2011).

19. ALONSO G. *et. al.*, "Process Heat Cogeneration using a high temperature reactor," *Jurnal Nuclear Engineering and Design*, Vol. 280, pp. 137–143 (2014).
20. HANAKLAUS N. *et. al.*, "Using high temperature gas-cooled reactors for greenhouse gas reduction and energy neutral production of phosphate fertilizers," *Jurnal Annals of Nuclear Energy*, Vol. 75, pp. 275–282 (2015).
21. YAN X. *et. al.*, "A small modular reactor design for multiple energy applications: HTR50S," *Jurnal Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 45, no. 3, pp. 401–414 (2013).
22. ASIEDU BOATENG P. *et. al.*, "Modeling and simulation of cogeneration nuclear power plant for seawater desalination," *Jurnal Nuclear Engineering and Design*, Vol. 242, pp. 143–147 (2012).
23. FANG C. *et. al.*, "Process heat applications of HTR-PM600 in Chinese petrochemical industry: Preliminary study of adaptability and economy," *Jurnal Annals of Nuclear Energy*, Vol. 110, pp. 73–78 (2017).
24. REIMERT R. *et. al.*, "Process heat from modularized HTR," *Jurnal Nuclear Engineering and Design*, Vol. 251, pp. 244–251 (2012).
25. <http://www.batan.go.id/index.php/id/ptkrn-id/berita-ptkrn/3723-batan-luncurkan-dokumen-basic-engineering-design-rde> Diakses tanggal 28 September 2018.
26. IAEA Nuclear Energy Series No. NG-G-3.1, "Milestones in the Development of a National Infrastructure of Nuclear Power", IAEA, September, Vienna (2007).
27. IAEA Nuclear Energy Series No. NG-T-3.2, "Evaluation of the Status of National Nuclear Infrastructure Development", IAEA, December, Vienna (2008).
28. SRIYANA, "Optimalisasi Partisipasi Industri Nasional dalam Pembangunan PLTN", *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, Volume 10, No.2 Hal. 87-96, Jakarta (2008).
29. ZONGXIN *et. al.*, "HTGR Projects in China," *Jurnal Nuclear Engineering and Technology*, Vol.39, pp. 103-110 (2007).
30. NicobarGroup, "China's Nuclear Industry 2017-2018", December (2017).
31. FU L. *et. al.*, "HTR-PM Safety Requirement and Licensing Experience," *Proceedings of HTR 2014*, pp.1-7 (2014).
32. ZUOYI Z. *et. al.*, "Future Development of Modular HTGR in China after HTR-PM," *Proceedings of HTR 2014* (2014).
33. ZUOYI Z. *et. al.*, "Design of Chinese Modular High-Temperature Gas-Cooled Reactor HTR-PM," 2<sup>nd</sup> Internasional Topical Meeting on HTR Technology (2004).
34. ZUOYI Z. *et. al.*, "The Shandong Shidao Bay 200 MWe HTGR-PM Demonstration Power Plant: An Engineering and Technological Innovation," *Jurnal Engineering*, Vol.2, pp.112-118 (2016).
35. MINATSUKI I. *et. al.*, "The Role of Japan's Industry in the HTR Design and its Construction," *Jurnal Nuclear Engineering and Design*, Vol.233, pp. 377-390 (2007).
36. YAN X. *et. al.*, "A Small Modular Reactor Design for Multiple Energy Applications: HTR50S," *Jurnal Nuclear Engineering and Technology*, Vol.45, No.3, pp.401-413 (2013).
37. SETIADIPURA T. *et. al.*, "Cooling Passive Safety Features of Reaktor Daya Eksperimental," *International Conference on Thermal Science and Technology (ICTST) 2017*, AIP Conf. Proc. 1984, 020034-1–020034-9; <https://doi.org/10.1063/1.5046618> Published by AIP Publishing. 978-0-7354-1700-7/\$30.00 (2017).
38. Swiss Nuclear Forum, A report by GUO Wentao, "Nuclear Developments in China," *Swiss Nuclear Forum* (2015).
39. INET - Tsinghua University, "International Topical Meeting on HTGR Technology," *INET* (2014).
40. <http://www.hitachi-hgne.co.jp/en/index.html> Diakses pada tanggal 9 October, 2018

**DISKUSI/TANYA JAWAB :**

**1. PERTANYAAN :**

HTR di China melibatkan stakeholder industri. Jika Indonesia membangun HTR untuk RDE,

- seberapa besar idealnya peran industri dan
- dalam bentuk apa (investasi??)

**JAWABAN :**

Peran industri dalam pembangunan PLTN sangatlah penting, sehingga IAEA telah menetapkan 19 infrastruktur dasar pembangunan PLTN yang salah satunya adalah keterlibatan industri (*industrial involvement*).

- Terkait rencana pembangunan RDE di Indonesia, sistem RDE dilihat dari komponennya dibedakan menjadi 2 bagian, yaitu bagian nuklir (*Nuclear Island*) dan bagian non-nuklir/konvensional (*conventional island*). Untuk komponen bagian konvensional seperti turbin, generator, kondenser dll, industri nasional sudah banyak berpengalaman dalam manufaktur dan memasok komponen dalam pembangunan pembangkit konvensional di Indonesia. Sementara untuk komponen bagian nuklir seperti RPV (*Reactor Pressure Vessel*), *helium circulator*, *steam generator*, *hot gas duct*, *reactor internals* dan bahan bakar, industri nasional belum berpengalaman dalam manufaktur, sehingga industri internasional yang akan memasok.
- Belajar dari pengalaman China dan Jepang membangun HTR-10, HTR-PM dan HTTR, BATAN sebaiknya sudah melibatkan industri-industri tersebut sejak awal mendisain komponen RDE hingga memasok komponen tersebut ketika konstruksinya. Untuk memberikan pengalaman dan meningkatkan kemampuan industri nasional dalam manufaktur komponen bagian nuklir HTGR, industri nasional terkait perlu diajak dan dilibatkan sejak mendisain hingga manufaktur dengan melakukan kerjasama disain dan manufaktur (*joint design and manufacture*) dengan industri internasional tersebut.

**2. PERTANYAAN :**

Pada keterlibatan industri (*industrial involvement*) apakah termasuk kesiapan industri internasional?

**JAWABAN :**

Selama ini industri nasional sudah sangat berpengalaman dalam manufaktur dan memasok komponen untuk bagian konvensional dalam pembangunan pembangkit listrik konvensional seperti PLTU, PLTG, PLTGU dll, sehingga bisa dikatakan industri nasional sudah siap untuk memasok komponen bagian konvensional. Sementara itu, industri nasional belum berpengalaman dalam manufaktur dan memasok komponen untuk bagian nuklir dalam pembangunan PLTN, sehingga industri nasional belum siap untuk memasok komponen bagian nuklir. Untuk terwujudnya pembangunan PLTN harus ada pasokan komponen dari bagian nuklir dan konvensional, sehingga membutuhkan kesiapan industri baik nasional maupun internasional. Oleh sebab itu, keterlibatan industri dalam makalah ini adalah mencakup kesiapan industri nasional dan internasional.

## KEMAMPUAN INDUSTRI TURBIN LOKAL DAN PROSPEKNYA UNTUK PROGRAM PEMBANGUNAN RDE DI INDONESIA

Dharu Dewi<sup>1</sup>, Arif Tris Yuliyanto<sup>2</sup>, Sriyana<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>PKSEN - BATAN, jalan Kuningan Barat, Mampang Prapatan, Jakarta 12710  
email: dharu\_dewi@batan.go.id

### ABSTRAK

**KEMAMPUAN INDUSTRI TURBIN LOKAL DAN PROSPEKNYA UNTUK PROGRAM PEMBANGUNAN RDE DI INDONESIA.** Turbin merupakan salah satu komponen utama dari Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) khususnya untuk Reaktor Daya Eksperimental (RDE) yang merupakan bagian komponen non nuklir. Industri komponen turbin di Indonesia perlu diketahui kemampuan dan prospeknya sehingga diharapkan dapat berpartisipasi dalam program pembangunan RDE di Indonesia. Tujuan dari kajian ini adalah mengidentifikasi kemampuan industri turbin lokal dan prospeknya untuk dapat berpartisipasi dalam pembangunan Reaktor Daya Eksperimental (RDE). Metodologi yang digunakan pada kajian ini adalah survei, kajian literatur dan *searching internet* yang terkait dengan industri turbin. Survei dilakukan dengan cara kunjungan teknis ke industri turbin yang berpotensi, yakni PT. Siemens Indonesia dan PT. Nusantara Turbin dan Propulsi, serta melakukan konsultasi teknis dengan narasumber industri. Dari hasil kajian dapat disimpulkan bahwa industri turbin lokal dengan kapasitas 3 MWe memiliki prospek dan kemampuan untuk dapat berpartisipasi dalam pembangunan RDE di Indonesia.

Kata kunci: turbin, industri, kemampuan, RDE, lokal.

### ABSTRACT

**CAPABILITY OF LOCAL TURBINE INDUSTRIES AND THEIR PROSPECT FOR NUCLEAR POWER PLANT CONSTRUCTION IN INDONESIA.** The Turbine is one of the main components of Nuclear Power Plants (NPPs) especially for Experimental Power Reactors (RDE). The turbine component industries from Indonesia needs to know its capabilities and prospects so that it is expected to be able to participate in the RDE construction programme in Indonesia. The purpose of this study is to identify the capability of the local turbine industries and its prospects to be able to participate in the construction of the Experimental Power Reactor (RDE). The methodology used in this study is surveys, literature studies and internet searching related to the turbine industry. The survey was carried out by technical visits to the potential turbine industries, technical consultations with industry management party and other industry practitioners. From this study, it was concluded that the local turbine industries had the capability with a capacity of 3 MWe have prospects and capability to participate in the RDE construction in Indonesia.

Keyword: turbine, industry, capability, RDE.

### PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik di Indonesia meningkat seiring dengan adanya peningkatan jumlah penduduk dan pertumbuhan industri. Pertumbuhan industri yang pesat menjadi alasan utama diperlukannya sumber energi non fosil yang dapat mengantisipasi kekurangan energi. Hal ini disebabkan sumber energi fosil jika digunakan secara terus menerus akan habis. Industri nasional memiliki banyak potensi sumber energi terbarukan yaitu energi non fosil yang berasal dari alam dan dapat diperbaharui bila dikelola dengan baik. Energi ini tidak akan habis, antara lain energi surya fotovoltaik, energi surya termal, energi biomasa /biogas, energi bioetanol, energi biodiesel, energi panas bumi, energi samudra (energi panas laut, energi pasang surut, dan energi gelombang), energi angin, energi nuklir, dan energi air [1, 2].

Sumber energi nuklir berasal dari Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) yang merupakan salah satu pembangkit alternatif untuk dapat memenuhi kebutuhan energi tersebut. Indonesia dalam hal ini BATAN sebagai lembaga penelitian dan pengembangan telah melakukan studi tentang perencanaan pembangunan Reaktor Daya Eksperimental (RDE) di Kawasan PUSPI TEK Serpong Tangerang. BATAN berencana membangun dan

mengoperasikan Reaktor Daya Eksperimental (RDE) yang menggunakan reaktor jenis *High Temperature Gas Cooled Reactor (HTGR)* dan direncanakan berdaya kecil yaitu 10 MWth atau 3 MWe. Beberapa reaktor HTGR daya kecil yang telah mempunyai pengalaman operasi adalah HTR-10 (*High Temperature Reactor 10 MW*) China dan HTTR (*High Temperature Engineering Tested Reactor*) Jepang [3].

RDE terdiri dari banyak komponen yang diklasifikasikan dalam dua kelompok besar yakni komponen bagian nuklir (*nuclear island*) dan bagian non nuklir (*non nuclear island*). Komponen bagian non nuklir memiliki potensi untuk dikembangkan dan diproduksi oleh industri lokal sehingga industri diharapkan dapat ikut berpartisipasi dalam pembangunan RDE di Indonesia. Salah satu komponen penting bagian non nuklir dalam sistem RDE adalah turbin. Turbin merupakan salah satu komponen utama dari RDE. Pada turbin uap, energi diperoleh dari uap super panas (*superheat*) yang dihasilkan oleh *boiler* [4].

Turbin berfungsi untuk mengubah tenaga uap yang melalui sudu-sudu (*blade*) menjadi tenaga mekanis berupa putaran. Semakin tinggi nilai efisiensi yang dihasilkan oleh turbin, semakin baik unjuk kerja komponen lain (termasuk generator uap dan kondenser) dalam sistem turbin uap [5]. Peningkatan ekonomi turbin uap nuklir, pengurangan biaya pembangkitan listrik dan peningkatan level operasi yang aman dari peralatan adalah isu penting pada PLTN. Untuk pembangkit listrik konvensional, efisiensi internal relatif dari turbin uap dapat dihitung dari pengujian termal. Turbin uap nuklir menggunakan uap saturasi sebagai uap baru, dan banyak titik ekstraksi pada area uap basah berkaitan dengan tekanan lebih rendah dan pengukuran entalpi uap basah masih dalam fase riset yang memberikan kesulitan dalam perhitungan efisiensi internal relatif dari turbin uap [6].

Industri turbin lokal perlu diketahui kemampuan dan prospeknya sehingga diharapkan dapat memasok turbin lokal. Tujuan dari studi adalah untuk mengidentifikasi kemampuan industri turbin lokal dan prospeknya agar dapat berpartisipasi dalam pembangunan RDE di Indonesia.

## TEORI/POKOK BAHASAN

Turbin uap (*Steam Turbine*) merupakan suatu penggerak mula yang mengubah energi potensial uap menjadi energi kinetik dan selanjutnya diubah menjadi energi mekanis dalam bentuk putaran poros turbin [7].

Komponen utama turbin uap terdiri dari dua bagian yakni bagian yang diam dan bagian yang berputar. Gambaran umum komponen turbin uap terdiri dari [8].

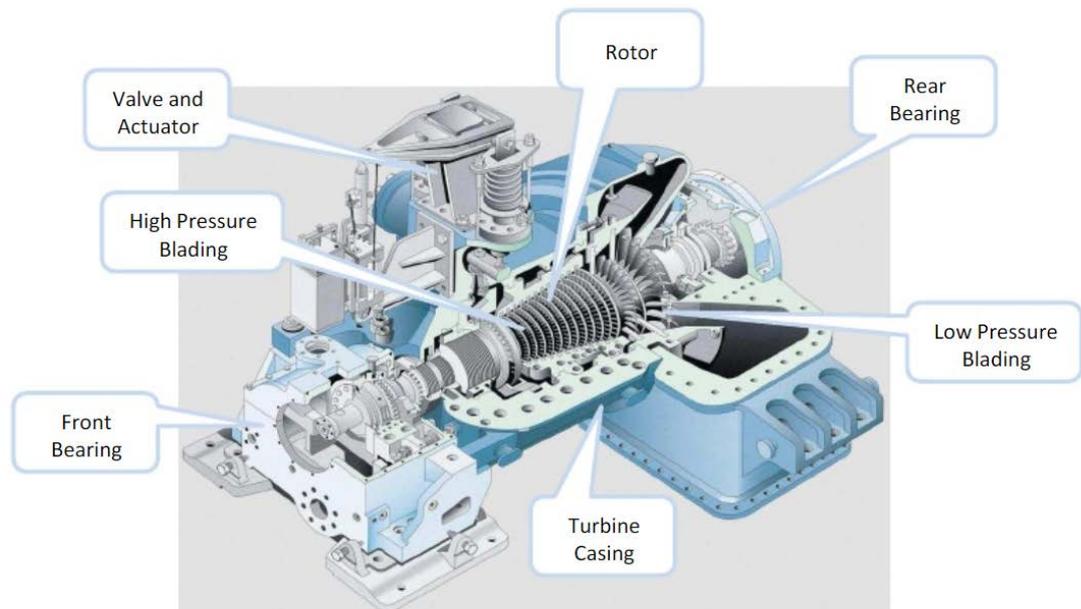
- *Base Frame / Base Plate* (Dasar tumpuhan)
- *Shell* atau rumah turbin (*casing*) dan *stator*.
- *Rotor*
- *Bearing Housing* dan Bantalan
- Penyekat
- Peralatan kontrol uap

Sedangkan yang termasuk dalam komponen *casing* dan *stator* adalah *casing*, *stator*, *diaphragm* dan *nozzle*. *Casing* pada turbin uap berfungsi untuk meletakkan semua komponen turbin uap pada posisinya agar unjuk kerjanya sesuai dengan rancangan. Uap dari generator uap sebagai energi yang akan diubah oleh turbin uap menjadi energi mekanik.

Uap masuk ke dalam sistem turbin uap yang bertemperatur dan bertekanan tinggi sesuai dengan kebutuhan energi yang dibutuhkan. Kapasitas produksi uap dapat berpengaruh pada putaran turbin. Secara umum semakin tinggi kapasitas produksi uap, temperatur masuk turbin dan tekanan uap dalam nozel maka akan semakin tinggi putaran turbin [9].

Semakin besar kebutuhan energi semakin tinggi temperatur dan tekanan yang dibutuhkan. Batasan atas dari temperatur dan tekanan adalah kemampuan material *nozzle* dan *blade* (sudu-sudu) untuk menerima panas dan gaya, namun diharapkan tidak ada perubahan dimensi atau ukuran serta sifat-sifat mikrostruktur yang akan memperpendek umur teknis material turbin uap tersebut. Penamaan *casing* ditentukan dari posisi dibagian dibawah disebut *Lower Casing (Bottom Casing)* dan bagian atas disebut *Upper Casing (Top Casing)*. Selain posisi penamaan juga menggunakan tekanan uap yang terjadi pada bagian tersebut, yaitu *High Pressure Casing*, *Intermediate* atau *Medium Pressure Casing* dan *Low Pressure Casing*. Penamaan juga didasarkan pada posisi arah radial yaitu *Inner Casing* dan *Outer Casing* [8]. Rotor adalah bagian terpenting dari turbin uap yang berputar, dimana fungsinya sebagai pengikat sudu – sudu turbin [10]. Sudu - sudu turbin merupakan

komponen kritical pada pembangkit listrik, yang mengkonversi aliran uap. Analisa kegagalan sudu-sudu turbin bertujuan untuk meningkatkan kehandalan sistem turbin secara umum. Beberapa hasil penelitian telah menunjukkan bahwa sudu-sudu tekanan rendah dari turbin uap umumnya ditemukan lebih rentan terhadap kegagalan dari sudu-sudu tekanan menengah dan tekanan tinggi. Mekanisme kegagalan yang paling umum yang terjadi dalam sudu-sudu tekanan rendah, biasanya yang berhubungan dengan getaran yang disebabkan oleh kondisi operasi, dan yang terjadi sebagai hasil dari ion korosif yang terbawa dan terakumulasi dalam fluida kerja dan diawali oleh pembentukan endapan atau deposit pada sudu-sudu serta komponen peredam (*damping wire*) [11]. Semakin tinggi nilai efisiensi yang dihasilkan oleh turbin, semakin baik unjuk kerja komponen lain (termasuk generator uap dan kondenser) dalam sistem turbin uap.



Gambar 1. Komponen Utama Turbin Uap [8].

Secara singkat prinsip kerja turbin uap adalah sebagai berikut [12] :

1. Uap masuk kedalam turbin melalui nosel. Didalam nosel energi thermal (kalor) dari uap diubah menjadi energi kinetik dan uap mengalami pengembangan. Tekanan uap pada saat keluar dari nosel lebih kecil dari pada saat masuk ke dalam nosel, akan tetapi sebaliknya kecepatan uap keluar nosel lebih besar dari pada saat masuk ke dalam nosel. Uap yang memancar keluar dari nosel diarahkan ke sudu-sudu turbin yang berbentuk lengkungan dan dipasang disekeliling roda turbin. Uap yang mengalir melalui celah-celah antara sudu turbin itu dibelokkan kearah mengikuti lengkungan dari sudu turbin. Perubahan kecepatan uap ini menimbulkan gaya yang mendorong dan memutar roda dan poros turbin.
2. Jika uap masih mempunyai kecepatan saat meninggalkan sudu turbin berarti hanya sebagian yang energi kinetis dari uap yang diambil oleh sudu-sudu turbin yang berjalan. Supaya energi kinetik yang tersisa saat meninggalkan sudu turbin dimanfaatkan maka pada turbin dipasang lebih dari satu baris sudu gerak. Sebelum memasuki baris kedua sudu gerak. Maka antara baris pertama dan baris kedua sudu gerak dipasang satu baris sudu tetap (*guide blade*) yang berguna untuk mengubah arah kecepatan uap, supaya uap dapat masuk ke baris kedua sudu gerak dengan arah yang tepat.
3. Kecepatan uap saat meninggalkan sudu gerak yang terakhir harus dapat dibuat sekecil mungkin, agar energi kinetik yang tersedia dapat dimanfaatkan sebanyak mungkin. Dengan demikian efisiensi turbin menjadi lebih tinggi karena kehilangan energi relatif kecil.

Komponen-komponen Pendukung Turbin :

- a. *Bearing* (Bantalan): berfungsi sebagai penyangga rotor sehingga membuat rotor dapat stabil/lurus pada posisinya didalam *casing* dan rotor dapat berputar dengan aman dan bebas.
- b. *Main Stop Valve (MSV)*: adalah katup penutup cepat yang berfungsi untuk memblokir aliran uap dari boiler ke turbin. Katup ini dirancang hanya untuk menutup penuh atau membuka penuh.
- c. *Governor Valve*: Katup ini berfungsi untuk mengontrol laju aliran uap ke turbin untuk mengendalikan putaran turbin.
- d. *Reheat Stop Valve (RSV)*: Fungsi utama *Reheat Stop Valve* adalah untuk menutup dengan cepat aliran uap dari *reheater* ke *intermediate pressure* turbin bila dalam keadaan bahaya.
- e. *Interceptor Valve*: adalah peralatan untuk mengontrol putaran pada *intermediate pressure* turbin dan membatasi putarannya pada batas tertentu adalah untuk mencegah turbin terhadap kemungkinan *overspeed* akibat aliran balik uap ekstraksi dari pemanas awal ke turbin atau *water induction* di turbin.
- f. Katup Ekstraksi Satu Arah: adalah untuk mencegah turbin terhadap kemungkinan *overspeed* akibat aliran balik uap ekstraksi dari pemanas awal ke turbin atau *water induction* di turbin.
- g. Katup Ventilasi: berfungsi untuk menghubungkan saluran *Main Stop Valve (MSV)* dengan *High Pressure* turbin dan RSV dengan *Intermediate Pressure* turbin dengan kondenser.
- h. Katup *Drain* berfungsi untuk membuang air dari dalam saluran pipa-pipa uap. Karena adanya air dalam saluran uap dapat menyebabkan kerusakan air, korosi, dan *water hammer*.
- i. *Turning Gear* berfungsi untuk memutar poros turbin ketika turbin *shutdown* dan *start*.
- j. *High Pressure Bypass Valve* adalah katup yang berfungsi untuk mengalirkan uap dari *superheater* ketika turbin trip atau belum bekerja. Uap ini langsung dialirkan ke *reheater* untuk kemudian mengalami pemanasan ulang.
- k. *Low Pressure Bypass Valve* adalah katup yang berfungsi untuk mengalirkan uap dari *reheater* ketika turbin *trip*. Uap ini langsung dialirkan ke kondenser.

## METODOLOGI

Metodologi yang digunakan adalah survei, kajian literatur dan *searching internet* yang terkait dengan industri turbin. Survei dilakukan dengan cara kunjungan teknis ke industri turbin yang berpotensi serta dilakukan konsultasi teknis dengan narasumber dari industri turbin dan praktisi industri lainnya.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Sampai saat ini penggunaan produk dalam negeri untuk pembangunan infrastruktur ketenagalistrikan khususnya pembangkit listrik konvensional seperti Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP), Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG), Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap (PLTGU), dan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) telah diatur dalam kebijakan Kementerian Perindustrian. Kebijakan ini berupa Pedoman Penggunaan Produk Dalam Negeri untuk Pembangunan Infrastruktur Ketenagalistrikan berdasarkan Peraturan Menteri Perindustrian Republik Indonesia Nomor: 54/IM-IND/PER/3/2012 [13]. Namun demikian khusus untuk ketenagalistrikan PLTN belum diatur. Setiap pembangunan infrastruktur ketenagalistrikan untuk kepentingan umum wajib menggunakan barang dan atau jasa produksi dalam negeri. Perhitungan besaran nilai Tingkat Komponen Dalam Negeri (TKDN) untuk barang dan jasa untuk masing – masing jenis pembangkit listrik memiliki standar minimal yang ditentukan oleh Kementerian Perindustrian.

Kementerian Perindustrian telah menerbitkan Rencana Induk Pembangunan Industri Nasional (RIPIN) 2015 – 2035 ditetapkan dengan Peraturan Pemerintah No. 14 tahun 2015 dan disusun sebagai pelaksanaan amanat Undang-Undang No. 3 tahun 2014 tentang Perindustrian, serta menjadi pedoman bagi pemerintah dan pelaku industri dalam perencanaan dan pembangunan industri. Program pengembangan industri prioritas disusun untuk periode 2015 – 2019 dan periode 2020 – 2035. Program Pengembangan industri untuk pembangkit energi periode 2015 – 2019 adalah memfasilitasi pendirian pabrik/pusat

pengolahan lanjut REE produk bahan baku nuklir sebagai bahan bakar pembangkit listrik atau bahan penolong beradiasi di industri dan mengembangkan rancang bangun fasilitas pembangkit listrik tenaga nuklir yang efisien dengan tingkat keselamatan yang tinggi. Sedangkan program pengembangan industri prioritas untuk periode 2020 – 2035 adalah memfasilitasi pendirian pabrik/pusat pengolahan lanjut REE produk bahan baku nuklir sebagai bahan bakar pembangkit listrik atau bahan penolong beradiasi di industri dan mengembangkan fasilitas pembangkit listrik tenaga nuklir efisien dengan teknologi dalam 5 tahun kedepan untuk mengatasi krisis listrik keselamatan yang tinggi [14,15]. Untuk menyiapkan pengembangan rancang bangun fasilitas PLTN yang efisien dan tingkat keselamatan yang tinggi maka perlu disiapkan pula industri - industri lokal yang memproduksi komponen PLTN yang memiliki potensi dan prospek untuk digunakan dalam pembangunan fasilitas PLTN. BATAN saat ini telah memiliki rencana untuk pembangunan fasilitas PLTN yakni pembangunan Reaktor Daya Eksperimental (RDE) dengan kapasitas 3 MWe. Dengan adanya rencana pembangunan RDE tersebut, diharapkan industri lokal dapat berpartisipasi dalam pembangunan RDE sehingga nilai TKDN meningkat.

Industri nasional menghadapi persaingan yang serius dalam memasarkan produk, baik di pasar domestik maupun ekspor. Untuk itu, daya saing industri nasional harus ditingkatkan. Kementerian Perindustrian menetapkan dua strategi dalam mendorong peningkatan daya saing industri nasional, yaitu pemanfaatan keunggulan industri nasional yang dimiliki saat ini dan peningkatan produktivitas industri [16]. Kementerian Perindustrian mendorong hilirisasi industri sebagai penggerak utama ekonomi nasional. Pengembangan industri perlu didukung dengan ketersediaan energi yang cukup besar. Industri komponen pembangkit listrik konvensional, khususnya industri komponen Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) berkembang dengan baik di Indonesia. Hal yang menggembirakan adalah telah dicapainya kemampuan bangsa Indonesia untuk membuat turbin uap dengan kapasitas 450 HP dan 2 MWe, yakni dengan kandungan lokal sebesar 89% dan telah diuji coba hingga 5000 putaran per menit (rpm). Sejak tahun 2005 telah dilakukan kerjasama antara PT. Nusantara Turbin & Propulsi (PT. NTP) dengan Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT) yang didukung oleh Kementerian Perindustrian dan telah berhasil melakukan fabrikasi dan mengembangkan turbin uap dengan kapasitas mulai dari 450 HP sampai 4 MWe dan selanjutnya secara konstan naik mencapai daya sebesar 7 MWe [17, 18]. Saat ini dikembangkan turbin dengan daya sebesar 7 MWe.

Tabel 1. Peralatan Rotasi Turbin [17]

Manufaktur	Perbaikan gas Turbin	Jasa/Layanan
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Steam Turbine 450HP</li> <li>• Steam Turbine 2 MWe</li> <li>• Steam Turbine 3MW</li> <li>• Steam Turbine 4MW</li> <li>Reverse Engineering</li> <li>Single &amp;</li> <li>Multi Stage Pump</li> <li>Gas Turbine Component</li> <li>LP and HP Gland Seal</li> <li>Various Rotating Component</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gas Turbine Blades</li> <li>• Gas Turbine Vanes</li> <li>• Transition Pieces</li> <li>• Combinations</li> <li>Baskets</li> <li>• Shroud Blocks</li> <li>• Ring Segments</li> <li>• Compressor Blades</li> <li>• Compressor Stators</li> <li>• Compressor Diaphragms</li> <li>• Lock Plates</li> <li>• Transition Clamp Shells</li> <li>• Fuel Nozzles</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gas Turbine</li> <li>• Centrifugal Compressor</li> <li>• Single &amp; Multi Stage Pump</li> <li>• Steam Turbine</li> <li>• Turbo Charger</li> <li>• Rotary Pump</li> <li>• Vertical Turbine Pump</li> <li>• Reciprocating Pump</li> <li>• Onsite SerMetel Coating</li> <li>• Onsite SerMalon Coating</li> <li>• Borescope Inspection</li> <li>• Balancing</li> <li>• Design, Development and Manufacture</li> <li>• Repair Bearing Specialist</li> <li>• LP and HP Gland</li> </ul>

		<i>Seal</i> • <i>Various Rotating Component</i>
--	--	--

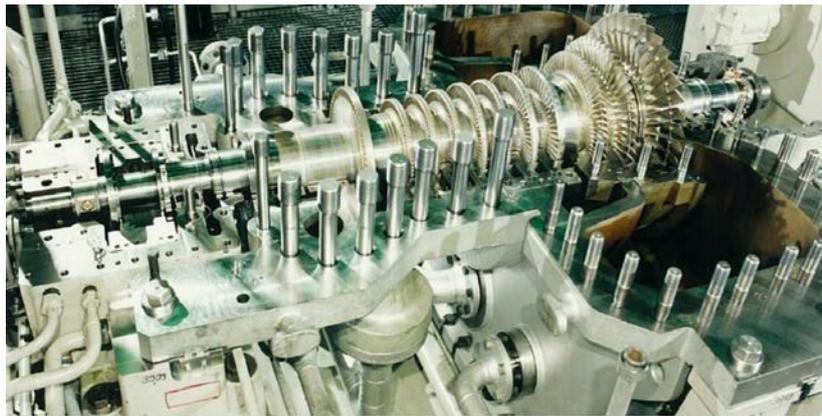


Gambar 1. Model Turbin produksi PT. Nusantara Turbin dan Propulsi [18].

PT. Siemens Industrial Power merupakan joint venture antara Siemens AG Jerman dengan PT. NTP untuk manufaktur turbin uap yang melayani pertumbuhan pasar energi di Indonesia. PT. Siemens Industrial Power memiliki kemampuan yang cukup potensial dalam memproduksi turbin uap karena mampu memproduksi turbin uap sampai dengan kapasitas 20 MW, sedangkan pembangunan RDE yang direncanakan di PUSPIPTEK Serpong hanya membutuhkan kapasitas 3 MWe. PT Siemens mampu memproduksi Turbine Inlet casing, condenser, stator winding, manufacturing rotor, low pressure outer case, bearing pedestal, HP steam Turbine, perakitan sudu-sudu, perakitan rotor, generator housing (Air Cool Type), generator casing (hydrogen cool type). PT. Siemens juga mampu membuat outer dan inner casing turbin uap dengan kapasitas daya yang besar. Generator casing dan stationary blade range untuk turbin juga mampu difabrikasi oleh PT. Siemens. Perakitan turbin berdaya besar (order kapasitas pembangkit 1.000 MWe) juga mampu dilakukan oleh PT. Siemens Industrial Power.

Untuk meningkatkan strategi peningkatan partisipasi industri nasional berdasarkan pengalaman PT. Siemens Industrial Power, ada tiga tahap yang dilakukan yakni tahap perencanaan, tahap review dan tahap pelaksanaan. Langkah strategi yang diperlukan sehingga dapat meningkatkan partisipasi industri nasional adalah sebagai berikut [19] :

1. Semua pengalaman dalam hal desain, *engineering* dan manufaktur dicatat dan harus mengacu pada pengalaman masa lalu sebagai pembelajaran (*lesson learned*) yang sangat berharga dan diperbaiki untuk ke depannya.
2. Semua kesalahan dalam *engineering* harus terekam/tercatat dalam *data base*.
3. Harus ada personil yang mengamati pagu pagu penting (*milestone*) setiap tahap kegiatan. Setiap pagu pagu penting harus dilakukan review.
4. Semua notula rapat terdokumentasi dengan baik sehingga sejarah dan pengembangan pekerjaan dapat ditelusuri secara efektif.
5. Perlunya mencari narasumber/tenaga ahli dari universitas untuk mendukung pengembangan dan peningkatan partisipasi industri.
6. Pemilik teknologi harus mengulang pekerjaan untuk mendapatkan hasil sesuai dengan yang dispesifikasikan.



Gambar 2. Komponen Turbin Uap PT. Siemens Industrial Power [20]

PT Barata Indonesia (Persero) resmi mengakuisisi pabrik Siemens Power dan Gas-Turbine Components yang berada di Cilegon, Banten. Hal ini ditandai dengan penandatanganan *Asset Purchase Agreement (APA)* antara PT. Barata Indonesia dan PT Siemens Indonesia pada tanggal 2 Agustus 2018. Penambahan aset ini merupakan upaya dan salah satu komitmen pemerintah untuk terus meningkatkan kandungan lokal dalam setiap proyek-proyek strategis pemerintah. PT. Barata Indonesia memegang peran penting dalam program elektrifikasi di Indonesia, sejalan dengan penugasan pemerintah sebagai koordinator dalam program kandungan lokal (*local content*) pembangkit listrik. PT. Barata Indonesia resmi mengakuisisi pabrik Siemens Power dan Gas -Turbine Components yang berada di Cilegon, Banten [21].

Industri turbin lokal dari PT. NTP dan PT. Siemens Industrial Power dapat memproduksi komponen turbin uap dengan kapasitas 3 MWe sesuai dengan spesifikasi turbin RDE. Pengembangan dan inovasi teknologi turbin telah dikembangkan oleh PT, NTP saat ini telah mencapai 7 MWe. Sedangkan PT. Siemens Industrial Power dapat melakukan fabrikasi turbin sampai dengan kapasitas 20 MWe. Potensi industri lokal tersebut dapat dikembangkan dengan kapasitas yang lebih besar sehingga prospek industri turbin di Indonesia untuk kapasitas 3 MWe yang sesuai dengan spesifikasi turbin RDE memiliki prospek yang sangat bagus untuk dapat berpartisipasi dalam pembangunan RDE di Indonesia.

## KESIMPULAN

Dari hasil kajian dapat disimpulkan bahwa industri turbin lokal telah mampu difabrikasi dengan kapasitas 3 MWe sehingga memiliki prospek yang bagus dan kemampuan untuk dapat berpartisipasi dalam pembangunan RDE di Indonesia.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada pihak PT. Siemens Industrial Power yakni Bapak Ir. Iman Rehatsyah (*Vice President* dan *General Manager* PT. Siemens Industrial Power) yang telah memberikan kesempatan untuk melaksanakan kunjungan teknis dan konsultasi teknis. Demikian juga kami sampaikan ucapan terima kasih kepada bapak Ir H. Lukman Jamaludin MM, MBA yang telah bersedia menjadi narasumber. Selain itu kami mengucapkan terima kasih yang tak terhingga kepada PT. Nusantara Turbin & Propulsi khususnya Bapak Ir. Taryadi (*Vice President* dan *General Manager* Industrial Turbine Services PT. NTP) yang telah meluangkan waktunya untuk berdiskusi dan konsultasi dengan pihak BATAN.

## DAFTAR PUSTAKA

1. BLUEPRINT, 2005, Pengelolaan energi Nasional 2005-2015. Jakarta.
2. RICHARD PIETERSZ, RUDY SOENOKO, SLAMET WAHYUDI, Pengaruh Jumlah Sudu Terhadap Optimalisasi Kinerja Turbin Kinetik Roda Tunggal, Jurnal Rekayasa Mesin Vol.4, No.3 Tahun 2013: 220-226, ISSN 0216-468X).

3. SITI ALIMAH, SRIYONO, Kajian Sistem Pemurnian Helium Reaktor HTGR Berdaya Kecil, *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir* Vol. 18, No. 2, (2016) 123-133, <http://dx.doi.org/10.17146/jpen.2016.18.2.3230>.
4. INFO ELEKTRO, <http://www.info-elektro.com/2017/06/pengertian-dan-prinsip-kerja-turbin-uap.html>, diakses tanggal 20 September 2018.
5. SRI SUDADIYO, JUPITER SITORUS PANE, "Desain Awal Turbin Uap Tipe Aksial Untuk Konsep RGTT30 Berpendingin Helium", *Jurnal Tri Dasa Mega*, Nomor : 632/AU3/P2MI-LIPI/03/2015, ISSN 1411-240X.
6. YONG LI, CHAO WANG, "Study on The Effect of Regenerative System on Power Type Relative Internal Efficiency of Nuclear Steam Turbine Energy Procedia, Volume 17, Part A, 2012, Pages 906-912.
7. JAMALUDIN PERMANA, IWAN KURNIAWAN, "Analisis Perhitungan Daya Turbin Yang Dihasilkan Dan Efisiensi Turbin Uap Pada Unit 1 Dan Unit 2 Di PT. Indonesia Power Uboh Ujp Banten 3 Lontar", *Motor Bakar: Jurnal Teknik Mesin*, Volume 1, No.2 (2017), <http://jurnal.umt.ac.id/index.php/mjtm/article/view/731/490>.
8. MULYANTO SUPANGAT, Komponen Utama Turbin Uap, [www.academia.edu/12859737/KOMPONEN\\_UTAMA\\_TURBIN\\_UAP](http://www.academia.edu/12859737/KOMPONEN_UTAMA_TURBIN_UAP).
9. VITRI PITRANDJALISARI, TONI DWI PUTRA, "Analisis Kapasitas Produksi Uap Terhadap Stabilitas Putaran Mesin Turbin", *Widya Teknika* Vol. 21, No. 1, Maret 2013,
10. ...., "Makalah Turbin Uap", [https://datenpdf.com/queue/makalah-turbin-uap--4\\_pdf?queue\\_id=-1](https://datenpdf.com/queue/makalah-turbin-uap--4_pdf?queue_id=-1).
11. ADHI KOMARA, YURIADI KUSUMA, "Analisis Kegagalan Blade Baris Terakhir pada Rotor Turbine Uap Tipe Condensing", *SINERGI* Vol. 18. No. 1. Februari 2014, ISSN: 1410-2331.
12. SUNARWO, SUPRIYO, "Analisa Heat Rate Pada Turbin Uap Berdasarkan Performance Test PLTU Tanjung Jati B Unit 3", *EKSERGI Jurnal Teknik Energi* Vol 11 No. 3 September 2015; 61-68.
13. KEMENTERIAN PERINDUSTRIAN, Pedoman Penggunaan Produk Dalam Negeri untuk Pembangunan Infrastruktur Ketenagalistrikan, Peraturan Menteri Perindustrian Republik Indonesia No: 54/M-IND/PER/3/2012.
14. PUSAT KOMUNIKASI PUBLIK KEMENTERIAN PERINDUSTRIAN, Rencana Induk Pembangunan Industri Nasional 2015 – 2035, Tahun 2015.
15. DHARU DEWI, "Strategi Peningkatan Daya Saing Industri Manufaktur untuk Pembangunan PLTN", *Prosiding Seminar Nasional XI Rekayasa Teknologi Industri dan Informasi 2016*, Sekolah Tinggi Teknologi Nuklir Yogyakarta.
16. ...., Dua strategi tingkatkan daya saing industri lokal, <https://industri.kontan.co.id/news/dua-strategi-tingkatkan-daya-saing-industri-lokal>.
17. PT. NUSANTARA TURBIN DAN PROPULSI, [http://www.umcntp.co.id/mro\\_industrial#turbin](http://www.umcntp.co.id/mro_industrial#turbin).
18. DHARU DEWI, ARIEF TRIS YULIYANTO, "Laporan Teknis Studi Strategi Peningkatan Partisipasi Industri Nasional dan Alih Teknologi PT. Nusantara Turbin & Propulsi (PT. NTP) dalam Bidang Pelayanan Turbin", Jakarta, 2015.
19. SRIYANA, DHARU DEWI "Laporan Perjalanan Dinas ke PT. Siemens Indonesia, Cilegon, 27 – 28 Maret 2015).
20. PT. SIEMENS INDONESIA, Presentasi PT. Siemens Indonesia Kunjungan Kepala BATAN ke industri PT Siemens Indonesia di Cilegon pada tanggal 17 Desember 2018.
21. ...., <https://www.liputan6.com/bisnis/read/3607900/barata-indonesia-ambil-alih-pabrik-turbin-siemens-di-cilegon>.

## PEMBUATAN SUMBER STANDAR <sup>131</sup>I UNTUK KALIBRASI ALAT UKUR AKTIVITAS STACK MONITOR PADA FASILITAS NUKLIR

Hermawan Candra<sup>1</sup>, Gatot Wurdianto<sup>1</sup>, Holnisar<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi BATAN, Jl. Lebak Bulus 49 Jakarta Selatan  
email: hermawan@batan.go.id

### ABSTRAK

**PEMBUATAN SUMBER STANDAR <sup>131</sup>I UNTUK KALIBRASI ALAT UKUR AKTIVITAS STACK MONITOR PADA FASILITAS NUKLIR.** Telah dilakukan pembuatan sumber standar <sup>131</sup>I dengan aktivitas 400 – 1000Bq untuk kalibrasi alat ukur aktivitas stack monitor pada fasilitas nuklir. Metode yang digunakan untuk perhitungan aktivitas secara relatif menggunakan kurva kalibrasi efisiensi. Radionuklida <sup>131</sup>I mempunyai waktu paro (T<sub>1/2</sub>): 8,0233 hari dan mempunyai energi gamma yang berintensitas tinggi yaitu : 364,489(5) keV (81,2%). Tahap pembuatan sumber standar <sup>131</sup>I meliputi pembuatan cuplikan <sup>131</sup>I dalam bentuk geometri cair dalam ampul dan padat dalam bentuk *point source*. Pencacahan cuplikan <sup>131</sup>I dilakukan menggunakan spektrometer gamma detektor semikonduktor HPGe dan kamar pengion 4πγ. Perhitungan aktivitas radionuklida <sup>131</sup>I menggunakan metode kurva kalibrasi efisiensi menggunakan sumber standar multi gamma <sup>152</sup>Eu. Hasil pengukuran aktivitas <sup>131</sup>I dengan metode relatif sistem pencacah spektrometer- γ detektor HPGe: pada waktu acuan [3-7-2018; 10.00 WIB] adalah (66,54 ± 0,03) Bq/mg atau (66,54 ± 0,93%) Bq/mg dengan ketidakpastian gabungan sebesar 3,21% .

Kata kunci: sumber standar <sup>131</sup>I, bentuk padat (*point source*), kalibrasi stack monitor, spektrometer gamma, fasilitas nuklir

### ABSTRACT

**MAKING STANDARD SOURCE OF <sup>131</sup>I FOR CALIBRATION OF ACTIVITY EQUIPMENT STACK MONITOR IN NUCLEAR FACILITY.** Production of standard <sup>131</sup>I source with an activity between 400 – 1000Bq for calibration activity of stack monitor equipment in nuclear facilities were carried out. The method used to calculate relative radioactivity was efficiency calibration curve method. <sup>131</sup>I radionuclide has a half live (T<sub>1/2</sub>) of 8.0233 days and gamma energy of 364.489(5) keV (81.2%). The production stages include sample preparation of <sup>131</sup>I in the forms of liquid in an ampoule and solid as a point source. <sup>131</sup>I sample was counted with gamma spectrometer counting system with HPGe semiconductor detector and 4π-γ ionization chamber counting system. Radioactivity measurement of <sup>131</sup>I was performed with efficiency calibration curve method and mathematical formula with multi gamma energy standard source of <sup>152</sup>Eu. The result of <sup>131</sup>I radioactivity measurement using relative method with gamma spectrometer with HPGe detector counting system were as follows: at reference time of 3-7-2018 and 10.00 WIB was (66,54 ± 0,03) Bq/mg or (66,54 ± 0,93%) Bq/mg with combined uncertainty of 3,21%

Keyword: standard souce of <sup>131</sup>I, solid in point source, stack monitor calibration, gamma spectrometer, nuclear facility

### PENDAHULUAN,

Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi dalam bidang nuklir telah berkembang pada berbagai bidang kegiatan. Pada bidang lingkungan iptek nuklir digunakan untuk memonitor tingkat paparan radiasi di lokasi yang ..., misal di fasilitas nuklir dan instalasi nuklir. Apabila tingkat radiasi di lokasi tersebut melampaui nilai batas aman maka sistem monitor ini secara otomatis akan memberikan tanda. Salah satu radionuklida lepasan reaktor adalah <sup>131</sup>I yang mempunyai energi gamma sebesar 356keV.

Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi (PTKMR) – Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) mempunyai misi melakukan pengembangan dan pengkajian serta penerapan lptek nuklir dalam bidang metrologi radiasi untuk keselamatan, keamanan dan kesehatan radiasi, maka penelitian, pengembangan dibidang keselamatan radiasi,

hususnya dalam bidang metrologi radiasi, termasuk didalamnya adalah kegiatan pengukuran aktivitas dan standarisasi radionuklida. Hal ini harus menjadi perhatian utama, agar sasaran utama dalam pembangunan lptek nuklir untuk keselamatan dan kesehatan radiasi terwujud.

Pada penelitian ini telah dilakukan pembuatan sumber standar <sup>131</sup>I bentuk padat. Tujuan kegiatan ini adalah meningkatkan kemampuan PTKMR BATAN dalam bidang metrologi radiasi khususnya pembuatan sumber standar <sup>131</sup>I untuk mengkalibrasi alat ukur aktivitas *stack monitor* pada fasilitas nuklir dan instalasi nuklir serta sebagai alat untuk pengendalian mutu di laboratorium standarisasi radionuklida.

Pembuatan sumber standar ini akan bermanfaat untuk :

1. meningkatkan kompetensi peneliti di Indonesia khususnya di BATAN dalam bidang metrologi radiasi.
2. menyediakan sumber standar radioaktif untuk kalibrasi alat ukur aktivitas.
3. Sebagai sumber acuan pengukuran radiasi pengion dan pengendalian mutu pengukuran aktivitas limbah radioaktif dan radiasi lingkungan, yang mempunyai ketertelusuran ke sistem internasional.
4. Mengurangi impor dan penghematan devisa negara. Tersedianya sumber standar radioaktif buatan sendiri, sebagai sumber standar acuan pengukuran radiasi pengion, sangat penting di lakukan sebagai jawaban dari tuntutan para pemangku kepentingan: Lembaga penelitian, Industri dan masyarakat pengguna zat radioaktif lainnya.

Permasalahan pada saat ini adalah kepemilikan sumber standar radionuklida yang digunakan oleh lembaga penelitian, industri dan rumah sakit sebagian besar import buatan negara lain seperti USA, Jerman, Perancis dll. Pembangunan dan pengembangan dalam bidang penelitian harus diarahkan untuk menggunakan produk sendiri dalam negeri. Pilihan ini dinilai lebih efisien, karena harga sumber standar radionuklida cukup mahal disamping itu dapat mengurangi ketergantungan produk luar negeri dan mengurangi nilai impor sehingga lebih menghemat devisa negara.

Dengan berbekal pada penguasaan ilmu pengetahuan dan teknologi metrologi radiasi dan ketersediaan sumber daya manusia yang berpengalaman maka standarisasi sumber standar radionuklida sebagai sumber acuan pengukuran aktivitas sangat mungkin dilakukan. Sumber standar radionuklida yang akan dibuat adalah sumber standar pemancar gamma campuran dan tunggal yang mempunyai jangkauan energi dari 40 – 1408 keV, dengan berbagai bentuk.

## TEORI

Peranan ilmu pengetahuan dan teknologi nuklir pada saat ini telah berkembang pesat untuk tujuan damai. Pada reaktor nuklir diperlukan sumber standar untuk mengkalibrasi alat ukur radiasi, salah satunya adalah sistem *stack monitor*. Sistem monitor ini berfungsi untuk memonitor tingkat paparan radiasi di lokasi yang diperkirakan memiliki tingkat radiasi, misal di fasilitas nuklir dan instalasi nuklir.

Radionuklida <sup>131</sup>I mempunyai waktu paro pendek 8,0233 hari dan merupakan pemancar beta dan diikuti oleh gamma dengan energi gamma 364,48 keV (81,6%), 636,97 keV (7,12%) dan 722,89 keV (1,78%). Intensitas (yield) terbesar pada energi gamma 364,5 keV sebesar 81,6%. Proses standarisasi radionuklida sering dilakukan menggunakan sistem pencacah spektrometer gamma. Pada pengukuran radioaktifitas sumber radioaktif menggunakan sistem pencacah spektrometer gamma ada beberapa faktor yang perlu diperhatikan, yaitu jenis detektor yang digunakan, daya pisah detektor dan efisiensi detektor. Pengukuran aktivitas sampel <sup>131</sup>I bentuk padat (titik) atau *point source* menggunakan sistem pencacah spektrometer gamma detektor semikonduktor *High Purity Germanium* (HPGe). Sebelum dilakukan pengukuran dilakukan analisa kualitatif menggunakan kurva kalibrasi energi sedangkan analisa kuantitatif menggunakan kurva kalibrasi efisiensi. Sumber standar yang digunakan adalah sumber standar <sup>152</sup>Eu buatan LMRI. mempunyai rentang energi rendah sampai tinggi (200keV sampai 1408 keV). Sumber standar <sup>152</sup>Eu dipilih sebagai sumber standar karena mempunyai waktu paro panjang (13,5 tahun) dan mempunyai rentang energi gamma yang lebar yaitu antara (200keV sampai 1408keV)

Nilai efisiensi yang sering dipakai adalah efisiensi mutlak. Nilai efisiensi tersebut dihitung dengan persamaan :

$$\varepsilon(E) = \frac{cps}{dps \times Y(E)} \quad (1)$$

dengan :

$\varepsilon(E)$  adalah efisiensi mutlak pada energi E

cps adalah laju pencacahan pada pengukuran

dps adalah aktivitas standard pada saat pengukuran

Y(E) adalah yield sebagai fungsi energi gamma

## METODOLOGI

### BAHAN

Pada penelitian ini sumber radioaktif  $^{131}\text{I}$  diperoleh dari PTRR Serpong dalam bentuk cair dengan komposisi kimia  $\text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{LiOH} + \text{KI}$  dalam  $\text{H}_2\text{O}$ . Untuk proses pengenceran menggunakan larutan pengemban (*larutan carrier*) yang dibuat dari campuran : 50  $\mu\text{g/L}$   $\text{Na}_2\text{SO}_3 + 50 \mu\text{g/L}$   $\text{Li(OH)} + 50 \mu\text{g/L}$   $\text{KI CoCl}_2$  dalam  $\text{H}_2\text{O}$ . Selain itu menggunakan larutan  $\text{Ag(NO}_3)$  0,1 N yang berguna untuk mengikat iodium menjadi endapan  $\text{AgI}$ . Larutan  $\text{SiO}_2$  digunakan untuk katalis yang berfungsi untuk memperhalus terbentuknya kristal. Preparasi sumber dilakukan dalam dua bentuk sampel yaitu cair dan padat.

Sampel bentuk cair dalam ampul untuk sistem pencacah kamar pengion  $4\pi$  terkalibrasi dengan sumber standar dari National Institute of Standards and Technology (NIST) Amerika. Preparasi sumber dalam bentuk padat (*point source*) untuk pengukuran menggunakan sistem pencacah spektrometer gamma detektor germanium kemurnian tinggi *High Purity Germanium (HPGe)* Model GC1018 buatan Canberra. Penyangga sumber dalam bentuk padat (*point source*) menggunakan bahan plastik polietilen (PE) dengan ketebalan  $\pm 25 \mu\text{g/cm}^3$ . Peralatan preparasi sumber radioaktif terdiri dari gelas erlemeyer, gelas beaker, pipet gelas, *baby bottle* dan timbangan analitik elektronik semi mikro Type ABT 220-5 DMT 7037 buatan KERN.

### PERALATAN

Kamar pengion  $4\pi$  mempunyai spesifikasi sebagai berikut Model detektor: Capintec CRC-7BT dengan rentang ukur 0,1  $\mu\text{Ci}$  sampai 80 Ci dengan diameter sumur 6 cm dan kedalaman sumur 25 cm serta ketebalan shielding Pb 3,2 mm. Isian gas memakai Argon dengan tekanan 1 atm. Kamar pengion  $4\pi$  ini terkalibrasi dengan sumber standar dari National Institute of Standards and Technology (NIST). Beberapa komponen pendukung seperti digital *readout* dan *Iometer (Low Input Impedance Electrometer)*. Untuk menjaga keakuratan dan kepresisian pengukuran, detektor ini secara rutin dilakukan cek kestabilan menggunakan sumber standar waktu paro panjang  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{166\text{m}}\text{Ho}$  dan  $^{137}\text{Cs}$ .

Sistem pencacah metode relatif spektrometer gamma detektor *HPGe* dalam penelitian ini mempunyai spesifikasi sebagai berikut. Model detektor: GC1018 buatan Canberra dengan efisiensi relatif 10%. Karakteristik fisik: mempunyai geometri *closed-end coaxial* dengan diameter 43,5 mm, panjang 47 mm dan jarak dari *window* 5 mm. FWHM menggunakan isotop  $^{57}\text{Co}$  pada energi- $\gamma$  122,06(12)keV adalah 0,85keV dan  $^{60}\text{Co}$  pada energi 1332 keV adalah 1,69 keV. Modul elektronik High Voltage Supply Type TC 950 buatan Tennelec dengan tegangan operasional (+) 4500 V, amplifier Type 2022 buatan Canberra, Multi Channel Analyzer Multiport II buatan Canberra dan Software pengolah data Genie 2000 buatan Canberra.

### Pembuatan Cuplikan

Pada penelitian ini sampel  $^{131}\text{I}$  dibuat dalam bentuk geometri cair dalam ampul dan marinelli sedangkan geometri padat dalam bentuk titik (*point source*). Aktivitas sumber radioaktif pada cuplikan disesuaikan dengan rentang ukur kemampuan peralatan atau detektor yang akan digunakan untuk pengukuran. Sumber radioaktif  $^{131}\text{I}$  dalam bentuk cair dalam ampul diukur menggunakan sistem pencacah kamar pengion  $4\pi$  Capintec CRC 7 BT. Bentuk padat diukur menggunakan sistem pencacah spektrometer gamma detektor *HPGe*.

Pada tahap awal sumber radioaktif  $^{131}\text{I}$  induk cair dalam vial yang diperoleh dari PTRR BATAN Serpong diukur menggunakan sistem pencacah kamar pengion  $4\pi$  Capintec

CRC 7BT dengan tujuan untuk memperkirakan aktivitas jenis (kBq/gram) dan besarnya faktor pengenceran. Aktivitas sumber radioaktif induk <sup>131</sup>I yang masih terlalu tinggi tersebut perlu diencerkan menggunakan larutan pengemban (larutan carrier): 50 µg/L Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>+ 50 µg/L Li(OH)+ 50 µg/L KI CoCl<sub>2</sub> dalam H<sub>2</sub>O .

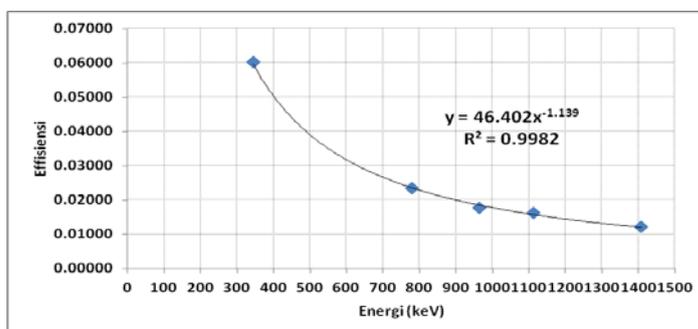
Sumber radioaktif <sup>131</sup>I larutan induk dipreparasi untuk membuat sampel dengan perlakuan tanpa pengenceran dan dengan pengenceran. Besar kecilnya pengenceran disesuaikan dengan peralatan atau detektor yang akan digunakan untuk pengukuran. Sumber radioaktif master <sup>131</sup>I cair yang sudah diencerkan diteteskan pada ampul dan dilakukan pengukuran menggunakan detektor kamar pengion 4πγ Capintec. Pada pengukuran aktivitas sumber radioaktif <sup>131</sup>I dengan sistem pencacah spektrometer gamma detektor HPGe, sampel dibuat dalam bentuk geometri padat (*point source*). Penimbangan cuplikan menggunakan metode gravimetri dengan cara variasi berat, menggunakan timbangan semi mikro Type ABT 220-5 DMT 7037 buatan KERN.

### Pencacahan Sampel

Sampel <sup>131</sup>I bentuk cair tanpa pengenceran dalam ampul diukur menggunakan sistem pencacah kamar pengion 4πγ Capintec CRC 7 BT terkalibrasi. Posisi cuplikan ampul tersebut di tengah-tengah sistem pencacah kamar pengion 4πγ dengan jarak 7 cm dari dasar lubuk. Sampel <sup>131</sup>I bentuk padat (*point source*) diukur menggunakan spektrometer-γ detektor HPGe. Sumber standar yang digunakan adalah sumber standar <sup>152</sup>Eu buatan Laboratorium primer *Laboratoire de Metrologie des Rayonnements Ionisant* (LMRI) dan sumber standar <sup>152</sup>Eu bentuk marinelli buatan PTKMR BATAN dan tertelusur pada Laboratorium primer *Laboratoire de Metrologie des Rayonnements Ionisant* (LMRI) yang mempunyai rentang energi-γ rendah sampai tinggi yaitu 200keV sampai 1408 keV.

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada pengukuran aktivitas radionuklida <sup>131</sup>I menggunakan sistem pencacah spektrometer-γ dengan detektor semikonduktor kemurnian tinggi (*High Purity Germanium* HPGe). Sampel radionuklida <sup>131</sup>I dalam bentuk padat (*point source*) sebanyak 10 buah. Pengukuran dilakukan pada jarak sampel dan detektor 25 cm. Analisa kualitatif dan kuantitatif menggunakan sumber standar multi-γ <sup>152</sup>Eu buatan laboratorium primer LMRI dan kurva kalibrasi efisiensi disajikan pada Gambar 1



Gambar 1. Kurva kalibrasi efisiensi menggunakan <sup>152</sup>Eu LMRI 100-1500 keV

Pada kurva kalibrasi efisiensi pada jarak sampel dan detektor 25 cm mempunyai nilai determinasi R<sup>2</sup> mendekati nilai 1 yaitu 0,9982. Dengan menggunakan persamaan pada kurva kalibrasi efisiensi pada masing-masing jarak pengukuran maka dapat diperoleh nilai efisiensi perhitungan sebesar (ε<sub>o</sub>) seperti disajikan pada tabel 1.

Tabel 1. Nilai efisiensi terukur dan perhitungan  $^{152}\text{Eu}$  sistem pencacah spektrometer- $\gamma$

Kode	E (keV)	Yield	Eff $\epsilon$	Eff fitting $\epsilon_0$	$\frac{\epsilon}{\epsilon_0}$
STD-1-13	344.279	0.2659	0.06029	0.05984	1.01
	778.905	0.1297	0.02334	0.02361	0.99
	964.079	0.145	0.01773	0.01852	0.96
	1112.076	0.1341	0.01612	0.01574	1.02
	1408.013	0.2085	0.01214	0.01203	1.01

Nilai efisiensi pada masing-masing energi gamma yang diperoleh dari hasil pengukuran ( $\epsilon$ ) dibandingkan dengan hasil perhitungan ( $\epsilon_0$ ) maka akan diperoleh nilai ( $\epsilon/\epsilon_0$ ) pada masing-masing jarak pengukuran. Perbandingan dari nilai tersebut disajikan pada Tabel 1. Perbandingan nilai efisiensi hasil pengukuran dibandingkan dengan hasil perhitungan cukup baik yaitu antara 0,95– 1,05.

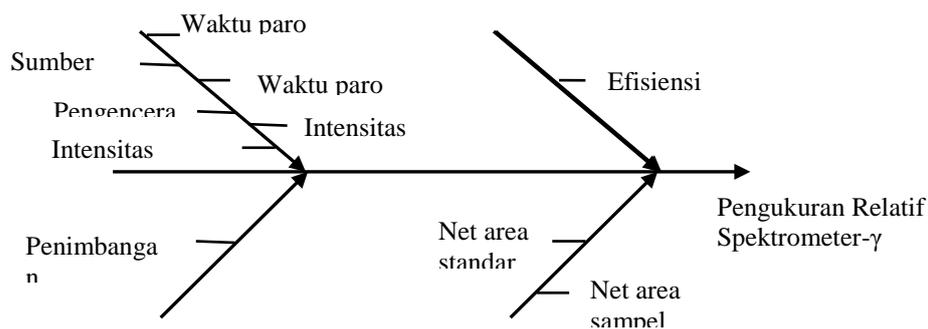
Pada kurva kalibrasi efisiensi pada daerah energi gamma diatas 100keV telah diperoleh nilai efisiensi yang semakin turun seiring dengan kenaikan energi gamma. Hal ini disebabkan karena pada daerah energi rendah kemampuan sinar gamma untuk berinteraksi dengan detektor sangat rendah. Sehingga kemampuan untuk menembus jendela aktif detektor juga semakin rendah. Sebaliknya dengan semakin meningkatnya energi gamma maka foton gamma meloloskan diri dari detektor tanpa berinteraksi menjadi cukup besar sehingga nilai efisiensi deteksinya juga akan turun

Tabel 2. Hasil pengukuran  $^{131}\text{I}$  bentuk padat *point source* menggunakan spektrometer gamma detektor HPGe

Kode	E (keV)	Yield	aktivitas Bq	Berat mg	aktivitas Bq/mg
13101-2018	364.489	0.812	419.29	6.306615	66.48
13104-2018			567.64	8.589009	66.09
13105-2018			551.51	8.388799	65.74
13109-2018			829.67	12.352957	67.16
13125-2018			576.27	8.629051	66.78
13127-2018			924.49	13.744416	67.26
13128-2018			834.98	12.403009	67.32
13129-2018			859.29	12.903535	66.59
13137-2018			636.42	9.710185	65.54
13138-2018			809.07	12.172768	66.47
Rata-rata					66.54
Standar deviasi					0.62
Kesalahan(%)					0.93

Hasil pengukuran aktivitas  $^{131}\text{I}$  bentuk padat *point source* menggunakan spektrometer gamma detektor HPGe disajikan pada Tabel 2. Nilai aktivitas total berkisar antara 400-1000 Bq dan aktivitas jenis rata-rata pengukuran pada waktu acuan [3-7-2018; 10.00 WIB] adalah  $(66,54 \pm 0,03)$  Bq/mg atau  $(66,54 \pm 0,93\%)$  Bq/mg

Komponen-komponen ketidakpastian pengukuran  $^{131}\text{I}$  menggunakan sistem pencacah spektrometer gamma terdiri dari komponen sumber standar, umur paro sumber standar, intensitas standar, net area standar, efisiensi deteksi, umur paro sampel, net area sampel, penimbangan dan Faktor Pengenceran. Komponen-komponen tersebut dapat digambarkan dalam diagram alir sebab akibat penentuan ketidakpastian pengukuran  $^{131}\text{I}$  seperti disajikan pada Gambar 2



Gambar 2. Diagram alir ketidakpastian pengukuran <sup>131</sup>I menggunakan spektrometer gamma

Perhitungan ketidakpastian gabungan pada pengukuran <sup>131</sup>I bentuk padat *point source* menggunakan spektrometer gamma disajikan pada Tabel 3. Pada tabel tersebut dapat dilihat ketidakpastian gabungan dari beberapa komponen ketidakpastian pengukuran setara dengan 3,21%

Tabel 3. Komponen Ketidakpastian Pengukuran Aktivitas <sup>131</sup>I; Spektrometer gamma dalam %

Komponen Ketidakpastian	Ketidakpastian Pengukuran	
	(%)	Type Ketidakpastian
Sumber standar	2,5	Type B
Umur paro sumber standar	0,12	Type B
Intensitas standar	0,53	Type B
Net area standar	0,87	Type A
Efisiensi deteksi	1,06	Type A
Umur paro sampel	0,0237	Type B
Intensitas sampel	0,985	Type B
Net area sampel	0,92	Type A
Penimbangan	0,25	Type B
Faktor Pengenceran	0,05	Type B
Ketidakpastian Gabungan Tingkat Kepercayaan 95%	3,21	

### KESIMPULAN

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan ada beberapa hal yang dapat diambil kesimpulan: PTKMR Batan telah mampu membuat Sumber Standar <sup>131</sup>I Bentuk padat untuk memenuhi kebutuhan pada fasilitas nuklir untuk kalibrasi peralatan *stack monitor* dengan aktivitas 400-1000 Bq dengan ketidakpastian pengukuran sebesar 3,21%

### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada : Rekan-rekan di Sub Bidang Standardisasi Radionuklida dan Instrumentasi PTKMR : yang telah membantun penulis sehingga karya ilmiah ini dapat terselesaikan

#### DAFTAR PUSTAKA

1. Nicholas Tsoulfanidis, *Measurements and Detection of Radiation*, University of Missouri-Rolla, 1983
2. NCRP Report No.58, *A Handbook of Radioactivity Measurements Procedures*, National Council on Radiation Protection and Measurements, November 1978
3. Lowenthal. Oakley, *Standardization of Radioactivity*, General Nucleonics Division, Australia Atomic Energy Commission, 1966
4. TdeR, 2005 Laboratoire National Henry Becquerel LNE-LNHB/CEA, Table de Radionuclides, Recommended Data/table, Atomic and NuclearData,2005,[http://www.nucleide.org/DDEP\\_WG/DDEPdata.htm](http://www.nucleide.org/DDEP_WG/DDEPdata.htm)
5. ICRP Publication 38, *Radionuclide Transformation Energy & Intensity of Emissions*, Vol. 11-13, Pergamon Press, Oxford. 1983
6. ICRU Report 52, *Particle Counting in Radioactivity Measurements*, International Commission on Radiation Units and Measurements, (1994)
7. Chapra, *Metode Numerik Untuk Teknik*, UI Press, 1991
8. Schrader, H. 1997, *Activity Measurements with ionization Chambers*, Monographie BIPM-4, Bureau International des poids et Mesures, sevres, France
9. Capintec, Inc, *CRC-7BT Radioisotope Calibrator* , Owner Manual
10. Hermawan Candra, *Performance Evaluation of Commercial Radionuclide Calibrators in Indonesians Hospitals*, Proceedings of the 18th International Conference on Radionuclide Metrology and its Applications, Proceedings of the 18th International Conference, Applied Radiation and Isotopes, Volume 70, Issue 9, September 2012, ISSN 0969-8043
11. K. Debertin And RG. Helmer, *Gamma and X-Ray Spectrometry With Semiconductor Detector*, 1988
12. Hermawan Candra, Pujadi, Gatot Wurdianto, *Pengaruh efek geometri pada kalibrasi efisiensi detector semikonduktor HPGe menggunakan spectrometer gamma* Seminar Nasional Fisika 2010 –Himpunan Fisikawan Indonesia (HFI) di Universitas Diponegoro, 10 APRIL 2010
13. WISNU SUSETYO, *Instrumentasi Nuklir II*, BATAN
14. ISO/IEC Guide 98-3:2008 *Uncertainty of measurement -- Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement* (GUM:1995)
15. BIPM, *Procedures for Accurately Diluting and Dispensing Radioactive Solutions*
16. Pujadi, Hermawan Candra, Pujadi, *Standardization of  $^{125}\text{I}$  and  $^{109}\text{Cd}$  by the Photon-Photon Coincidence Method in PTKMR BATAN* Proceedings of the 18th International Conference on Radionuclide Metrology and its Applications, Proceedings of the 18th International Conference, Applied Radiation and Isotopes, Volume 70, Issue 9, September 2012, ISSN 0969-8043
17. Gatot W, Pujadi, Hermawan Candra, *Radioactivity Measurement of  $^{18}\text{F}$  in 16ml Vials for Calibration of Radionuclide Calibrators* Proceedings of the 18th International Conference on Radionuclide Metrology and its Applications, Proceedings of the 18th International Conference, Applied Radiation and Isotopes, Volume 70, Issue 9, September 2012, ISSN 0969-8043
18. Hermawan Candra, Pujadi, Gatot Wurdianto, *Koreksi Ketidaklinieran Kalibrasi Energi Pada Spektrometer Gamma Menggunakan Radionuklida Multi Gamma  $^{166\text{m}}\text{Ho}$* , Prosiding Seminar Nasional Applied Science for Technology Innovation - ASTECHNOVA Fakultas Teknik Universitas Gajah Mada, Yogyakarta 2009
19. Hermawan Candra, Pujadi, Gatot Wurdianto, *Metode Statistik Untuk Penentuan Luas Puncak Serapan Total Pada Kalibrasi Efisiensi Menggunakan Spektrometer Gamma*, Prosiding Pertemuan Dan Presentasi Ilmiah Fungsional Pengembangan Teknologi Nuklir II, Badan Tenaga Nuklir Nasional, Jakarta 29 Juli 2008
20. Susilo Widodo, *Pengukuran Aktivitas Secara Absolut sumber-sumber standar buatan PDS BATAN*, Majalah BATAN Vol XVII No.1 April 1994.

Halaman ini sengaja di kosongkan

# **KELOMPOK F**

---

**REGULASI DAN LAIN-LAIN**

Halanan ini sengaja dikosongkan

## KAJIAN ASPEK HUKUM PLTN TERAPUNG DI INDONESIA

Mudjiono<sup>1</sup>, Yaziz Hasan<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Pusat Kajian Sistem Energi Nuklir, Jl. Kuingan Barat, Mampang Prapatan, Jakarta 12710

<sup>2</sup> Biro Hukum, Humas dan Kerjasama, Jl. Kuingan Barat, Mampang Prapatan, Jakarta 12710  
email: mudzi@batan.go.id

### ABSTRAK

#### KAJIAN ASPEK HUKUM PEMBANGKIT TENAGA NUKLIR TERAPUNG DI INDONESIA.

Semua konsep Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) Terapung berpotensi pengembalian bahan bakar bekas, fasilitas reaktor dan peralatan yang diradiasi ke negara pemasok pada akhir masa hidupnya. Sebagian besar negara pemasok nuklir tidak akan menerima kembalinya bahan bakar bekas untuk penyimpanan dan pembuangan permanen. Dalam aspek hukum disarankan bahwa *host state* dan *supplier state* secara eksplisit membahas dalam suatu perjanjian yang akan mengatur operasi PLTN tersebut. Hasil kajian menunjukkan bahwa pilihan pendekatan perlu direncanakan untuk menyiapkan segala persoalan hukum yang akan terjadi di kemudian hari. Dua pendekatan teknis dimungkinkan akan muncul, yang **pertama**, pendekatan inovatif yaitu membangun, mengisi bahan bakar, dan melakukan commissioning sebuah reaktor di negara pemasok dan kemudian dipindahkan ke negara operasi. Sedangkan **kedua**, konstruksi di sebuah lokasi di satu negara pemasok dan kemudian mengangkut fasilitas manufaktur lengkap ke negara operasi, di mana kemudian dimuat dengan bahan bakar nuklir yang secara terpisah diangkut ke Negara tempat operasi. Kedua pendekatan tersebut memerlukan perencanaan aspek hukum untuk menyikapinya.

Kata kunci: PLTN, terapung, hukum.

### ABSTRACT

#### ASSESSMENT ON LEGAL ASPECTS OF FLOATING NUCLEAR POWER PLANTS IN INDONESIA.

All concepts of Nuclear Power Plant (NPP) Floating has the potential to return used fuel, reactor facilities and irradiated equipment to the supplier country at the end of its life. Most nuclear supply countries will not receive return of used fuel for permanent storage and disposal. In the legal aspect it is recommended that host states and supplier states explicitly discuss in an agreement that will regulate the operation of the nuclear power plant. The study results show that the choice of approach needs to be planned to prepare for all legal issues that will occur in the future. Two possible technical approaches will emerge, the first, the innovative approach of building, refueling, and commissioning a reactor in the supplier country and then being transferred to the operating country. While second, construction at a location in one supplier country and then transporting complete manufacturing facilities to the country of operation, where it is then loaded with nuclear fuel which is separately transported to the country where it is operating. Both approaches require planning legal aspects to respond to them.

Keyword: NPP, floating, legal

### PENDAHULUAN

Sekitar dua bulan terakhir media Indonesia dihiasi dengan pemberitaan tentang PLTN Terapung (PLTNT) pertama di dunia buatan Rosatom Rusia[1-8], yang bernama *Akademik Lomonosov*. Diiringi kekhawatiran *Green Peace*, telah diluncurkan pada tanggal 5 Mei 2018 yang lalu, kapal nuklir berbobot 21.000 ton berawak 69 orang dengan ukuran 144 x 30 meter yang memiliki dua reaktor nuklir jenis KLT-40 masing-masing berkekuatan 35 MWe dan dijadwalkan akan ditarik menuju Pelabuhan *Pevek* yang terletak di daerah otonom *Chukotka* di timur laut Rusia. Struktur reaktor nuklir terintegrasi dalam kapal *Akademik Lomonosov* dan didesain dapat berpindah secara mobile di atas permukaan air dari grid listrik di pantai, dan secara teknis memungkinkan untuk maintenance di lokasi pembangkitan listrik atau dapat juga dibawa menuju galangan kapal. Rosatom mengklaim bahwa *Akademik Lomonosov* sudah sesuai standar keselamatan IAEA dan tidak menyebabkan ancaman lingkungan, serta hampir tahan terhadap tsunami dan bencana alam lainnya. Berbeda secara diametral dengan pandangan *Green Peace* bahwa lambung kapal yang datar akan sangat rentan terhadap tsunami dan badai.

Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) yang dapat dipindahkan, disebut dengan PLTN lepas pantai (*Offshore Nuclear Power Plant*, ONPP), sudah dikembangkan oleh beberapa negara dengan berbagai tipe dan daya keluarannya. Amerika mengembangkan dengan *mPower* dengan daya 125 MWe[9] dan *NuScale* 45 MWe per modul[10], yang keduanya berbasis PWR. Rusia selain yang disebutkan di atas juga mengembangkan SVBR-100 dengan daya 100 MWe per modul[11,12]. Jepang mengembangkan 4S (*super safe, small and simple*) 10 MWe, India membangun sebesar 100 KW(th) dinamakan CHTR (*Compact High Temperature Reactor*)[13,14], Korea membangun SMART (*System Integrated Modular Advanced Reactor*) 100 MWe[15-16], Argentina dengan CAREM-300 (*Central Argentina de Elementos Modulares*) sebesar 300 MWe[17,18], Perancis mengembangkan *Flexblue*[19] dengan keluaran listrik antara 50 MWe sampai dengan 250 MWe.

Sebagaimana disebutkan dalam *the Handbook on Nuclear Law* terdapat 3 atribut utama pada pengaturan transportasi material nuklir yang dapat mengakibatkan implikasi hukum, yaitu: terkait daya angkut reaktor; skenario operasional; dan pengangkutan bahan bakar di dalam reaktor. Pilihan terhadap penanganan konstruksi PLTN yang dapat dipindahkan akan berimplikasi hukum bagi Negara Pemasok (*supplier state*) dan negara tempat operasi PLTN (*host state*)[20]

## POKOK BAHASAN

Semua konsep PLTNT berpotensi pengembalian bahan bakar bekas, fasilitas reaktor dan peralatan yang diradiasi ke negara pemasok pada akhir masa hidupnya. Saat ini, sebagian besar negara pemasok nuklir tidak akan menerima kembalinya bahan bakar bekas untuk penyimpanan dan pembuangan permanen. Oleh karena itu, disarankan bahwa *host state* dan *supplier state* secara eksplisit membahas dalam suatu perjanjian yang akan mengatur operasi PLTN tersebut. Dua pendekatan teknis dimungkinkan akan muncul, yang **pertama**, pendekatan inovatif yaitu membangun, mengisi bahan bakar, dan melakukan commissioning sebuah reaktor di negara pemasok dan kemudian dipindahkan ke negara operasi. Sedangkan **kedua**, konstruksi di sebuah lokasi di satu negara pemasok dan kemudian mengangkut fasilitas manufaktur lengkap ke negara operasi, di mana kemudian dimuat dengan bahan bakar nuklir yang telah secara terpisah diangkut ke Negara tempat operasi.

Untuk pendekatan pertama, diasumsikan bahwa terpenuhinya kejelasan hukum di semua tahap yang dilalui, maka terikat dengan undang-undang di Negara Pemasok dan hukum internasional yang berlaku. Setelah dipasang di Negara tempat operasi, akan jatuh di bawah yurisdiksi Negara itu. Setiap detail spesifik atau modifikasi yang dilakukan bisa menjadi subjeknya dari perjanjian antara negara-negara ini. Kesepakatan itu diharapkan untuk menentukan bagaimana tanggung jawab keamanan dan pelaksanaannya. Dengan tidak adanya perjanjian semacam itu (misalnya sifat komersial dari transaksi terkait dengan PLTNT), undang-undang dan peraturan nasional akan berlaku. Seandainya transit melalui wilayah Negara ketiga dalam perjalanannya dari Negara pemasok ke Negara tuan rumah tempat operasi, pengaturan khusus harus dicapai dengan Negara ketiga itu. Transportasi laut, termasuk perjalanan melalui selat internasional, daerah maritim lainnya atau laut lepas akan diatur oleh aturan hukum internasional yang berlaku, termasuk hukum laut. Dalam beberapa tahun terakhir, pengangkutan bahan bakar atau limbah radioaktif telah menimbulkan beberapa masalah dan konflik antara Negara-negara yang terkait dengan transit, lintasan yang dilalui atau navigasi di laut lepas. Dengan hal tersebut maka perlu dipikirkan terhadap permasalahan transportasi laut PLTNT yang terkait dengan kemungkinan menimbulkan masalah tambahan atau persyaratan hukum. Disisi lain, perlu dicatat bahwa masalah yang terkait dengan kemampuan Negara tuan rumah untuk mematuhi persyaratan jika bahan bakar disegel di dalam bejana reaktor di Negara pemasok sehingga negosiasi dengan IAEA perlu untuk dibahas[20].

Sedangkan untuk pendekatan kedua, dapat dipastikan tidak memiliki masalah hukum baru di mana pengangkutan reaktor ke Negara tuan rumah berada dalam kondisi yang tidak terkontaminasi, dan mirip dengan pengangkutan komponen untuk reaktor yang sudah ada yang dilakukan berkali-kali di masa lalu. Bahan bakar akan diangkut secara terpisah di bawah peraturan yang ada untuk pengangkutan bahan bakar segar dan karenanya tidak akan menimbulkan masalah hukum tambahan. Pada akhir kehidupan, atau untuk merelokasi PLTNT, bahan bakar akan dipindahkan sebagai bahan bakar bekas. Sedangkan PLTNT akan dipindahkan sebagai komponen yang telah diiradiasi, tentunya akan

memerlukan pengaturan khusus, tetapi telah dicapai untuk pengangkutan komponen teradiasi sebelumnya. Sebagaimana pendekatan pertama, untuk pilihan pendekatan kedua tersebut disarankan bahwa Negara Pemasok dan Negara Tuan Rumah agar menandatangani perjanjian internasional tentang subyek yang diketengahkan.

Pilihan pendekatan tersebut akan mempengaruhi perencanaan manajemen PLTNT yang akan berimplikasi hukum. Oleh karena itu perlu dilakukan kajian yang meneluruhkan aspek hukum terhadap pemanfaatan PLTNT agar di kemudian hari tidak berdampak hukum dalam pelaksanaannya. Sampai saat ini, Indonesia mempunyai Undang-Undang (UU) Republik Indonesia Nomor 10 tahun 1997 tentang Ketenaganukliran[21] yang mengatur pemanfaatan tenaga nuklir. Tanggungjawab penelitian dan pengembangan tenaga nuklir dilakukan oleh Badan Pelaksana, dalam Peraturan Pemerintah Nomor 2 tahun 2014 disebutkan bahwa badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) sebagai pelaksana, dan harus diselenggarakan dalam rangka penguasaan ilmu pengetahuan dan teknologi nuklir untuk keselamatan, keamanan, ketenteraman, dan kesejahteraan rakyat serta memperhatikan untuk mengurangi dampak negatif pemanfaatan tenaga nuklir. Dalam pelaksanaannya BATAN dapat bekerjasama dengan instansi dan badan lain. Dalam UU No 10 tahun 1997 juga mengamanatkan bahwa untuk pembangunan, pengoperasian, dan dekomisioning reaktor nuklir non komersial dilaksanakan oleh Badan Pelaksana dan dapat bekerjasama dengan instansi pemerintah lainnya dan perguruan tinggi negeri. Sedangkan untuk pembangunan, pengoperasian, dan dekomisioning reaktor nuklir komersial dilaksanakan oleh Badan Usaha Milik Negara, koperasi, dan/atau badan swasta, yang ditetapkan oleh Pemerintah setelah berkonsultasi dengan Dewan Perwakilan Rakyat Republik Indonesia. Sementara pengawasan terhadap pemanfaatan reaktor nuklir dilakukan Badan Pengawas.

## **METODOLOGI**

Metode yang digunakan pada kajian PLTNT tersebut dengan melakukan pengumpulan data sekunder yang terkait dengan aspek hukum, dan selanjutnya dibahas dan didiskusikan dengan narasumber. Dalam mendukung capaian proses diperlukan komputer yang terkoneksi dengan internet untuk penguatan referensi yang dibutuhkan.

## **HASIL DAN PEMBAHASAN**

Pendekatan yang telah dipilih akan berimplikasi terhadap perencanaan pengoperasian PLTNT. Pada skenario pertama, pemasok bertindak sebagai operator yang akan mengoperasikan PLTNT selama masa hidupnya dan kemudian dekomisioning PLTNT, sedangkan Indonesia sebagai Negara tuan rumah, menjamin peraturan dan perizinan. Pengoperasian PLTNT oleh pemasok memerlukan lisensi dari lembaga regulator. Negara Pemasok akan bertindak sesuai dengan kewajibannya berdasarkan kontrak dengan Indonesia dan, tunduk pada ketentuan yang berlaku. Kesepakatan antara semua pihak yang terlibat harus dipertimbangkan. Selain Negara Pemasok dan Indonesia, juga Negara-negara ketiga melalui wilayah di mana PLTNT akan transit (Negara transit) dapat dianggap sebagai Negara yang dilibatkan. Sebuah perjanjian antara Negara Pemasok dan Indonesia, ditambah kesepakatan dengan Negara transit, akan menangani masalah keselamatan dan keamanan PLTNT dan tanggung jawab material untuk kerusakan nuklir sebelum PLTNT operasional. Semua operasional itu juga akan diatur oleh konvensi internasional yang relevan.

Secara khusus, potensi konflik terkait dengan kemungkinan transportasi laut PLTNT tersebut akan muncul. Prinsip dan aturan hukum laut akan memberikan panduan dalam hal itu. Dari pengalaman menunjukkan bahwa navigasi melalui selat internasional dan di zona ekonomi eksklusif Negara-negara pantai tertentu memang menciptakan konflik. Oleh karena itu, diharapkan bahwa negara-negara yang terlibat perlu diundang untuk mempertimbangkan isu-isu yang berkaitan dengan transit dan navigasi PLTNT di laut. Selain masalah lingkungan, masalah tanggung jawab nuklir bisa menjadi objek pembahasan. Dalam pendekatan ini juga memperkenalkan konsep desain dan persetujuan manufaktur untuk desain yang dibangun dan ditugaskan di satu Negara sebelum beroperasi di negara lain. Dalam perspektif yang lebih panjang, ini mengarah pada pertimbangan sertifikasi desain internasional dan masalah tanggung jawab terkait untuk reaktor yang dapat dioperasikan dalam perjalanannya.

Dalam skenario kedua, Indonesia bertanggung jawab atas pengoperasian PLTNT, mempertahankan dan bertanggungjawab untuk regulasi dan perizinan, mirip dengan sebagian besar PLTN yang beroperasi saat ini. Negara Tuan Rumah perlu memastikan bahwa memiliki kemampuan untuk mengatur penentuan tapak, desain, manufaktur, komisioning dan operasi PLTNT ini. Dimungkinkan mendapatkan bantuan internasional termasuk dari Negara pemasok. Dianjurkan bagi Indonesia untuk mempertimbangkan batas waktu perjanjian bilateral dengan Negara pemasok yang akan mengatur semua aspek hukum dari proyek, termasuk ketentuan yang mungkin tentang kembalinya PLTNT dan bahan bakar ke Negara pemasok.

Dalam UU No 10 tahun 1997 tidak menyebutkan tempat atau tapak pembangkit tenaga nuklir di darat atau di laut. Namun di Peraturan Pemerintah (PP) Republik Indonesia No 2 tahun 2014 tentang perizinan instalasi nuklir dan pemanfaatan bahan nuklir[22] secara jelas disebutkan bahwa lokasi tapak PLTN adalah di daratan. Dengan demikian maka untuk PLTNT belum diatur secara eksplisit dalam peraturan di Indonesia. Oleh karena itu maka segala hal yang terkait pemanfaatan PLTNT harus terikat dengan peraturan yang saat ini sudah ada, baik peraturan pengangkutan bahan-bahan nuklir, hukum maritim dan hukum internasional. Sebagaimana disebutkan dalam PP No 2 tahun 2014 Dalam hal Pembangunan Reaktor Daya Komersial, semua struktur, sistem, dan komponen yang penting untuk keselamatan dalam Reaktor Nuklir telah teruji pada lingkungan yang relevan atau sesuai dengan kondisi operasi, dan diterapkan dalam purwarupa; dan telah diberikan izin operasi secara komersial oleh badan pengawas dari negara yang telah membangun Reaktor Daya komersial.

Dalam Undang Undang Republik Indonesia Nomor 17 tahun 2008 tentang Pelayaran[23], disebutkan bahwa Keselamatan dan Keamanan Pelayaran adalah suatu keadaan terpenuhinya persyaratan keselamatan dan keamanan yang menyangkut angkutan di perairan, kepelabuhanan, dan lingkungan maritim. Dan PLTNT secara fisik akan berbentuk sebagai Kapal, maka harus memenuhi persyaratan sebagaimana dalam UU Pelayaran. Kapal dikatakan laik bila keadaan kapal yang memenuhi persyaratan keselamatan kapal, pencegahan pencemaran perairan dari kapal, pengawakan, garis muat, pemuatan, kesejahteraan Awak kapal dan kesehatan penumpang, status hukum kapal, manajemen keselamatan dan pencegahan pencemaran dari kapal, dan manajemen keamanan kapal untuk berlayar di perairan tertentu. Dalam undang-undang ini juga disebutkan bahwa keselamatan kapal adalah keadaan kapal yang memenuhi persyaratan material, konstruksi, bangunan, permesinan dan perlistrikan, stabilitas, tata susunan serta perlengkapan termasuk perlengkapan alat penolong dan radio, elektronik kapal, yang dibuktikan dengan sertifikat setelah dilakukan pemeriksaan dan pengujian.

Dalam Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 58 tahun 2015 tentang Pengangkutan Zat Radioaktif[24], disebutkan bahwa dalam hal pengangkutan bahan nuklir harus menyebutkan klasifikasi bahan nuklir sebelum pelaksanaan pengangkutan. Permohonan secara tertulis harus dilengkapi dengan persyaratan yang meliputi: identitas pemohon; jadwal kedatangan zat radioaktif; rute Pengangkutan Zat Radioaktif; sertifikat atau salinan sertifikat persetujuan Desain zat radioaktif yang diterbitkan oleh otoritas pengawas negara asal Desain zat radioaktif, negara asal Pengangkutan Zat Radioaktif, atau negara yang telah dilalui atau disinggahi dalam Pengangkutan Zat Radioaktif sebelumnya; serta menjelaskan deskripsi zat radioaktif. Disamping itu harus sesuai dengan persyaratan yang ditetapkan dalam Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 6 Tahun 2016 tentang Keamanan Sumber Radioaktif[25].

## KESIMPULAN

Lokasi tapak PLTN di Indonesia secara eksplisit tercantum dalam Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 2 tahun 2014 tentang perizinan instalasi nuklir dan pemanfaatan bahan nuklir disebutkan di daratan. Penulis berkesimpulan bahwa PLTNT masih dimungkinkan dibangun di Indonesia bila perangkat hukum yang ada bisa mengakomodasi perkembangan teknologi dan harus memenuhi persyaratan peraturan hukum terkait, seperti UU no 17 tahun 2008 tentang Pelayaran, yang mengharuskan bahwa Keselamatan dan Keamanan Pelayaran dengan terpenuhinya persyaratan keselamatan dan keamanan yang menyangkut angkutan di perairan, kepelabuhanan, dan lingkungan maritim. Disamping itu harus memenuhi PP no 58 tahun 2015 tentang Pengangkutan Zat Radioaktif bahwa dalam hal pengangkutan bahan nuklir harus menyebutkan klasifikasi bahan nuklir dan permohonan secara tertulis diajukan. Secara teknis dalam perjalanan akan berpotensi konflik terkait dengan kemungkinan transportasi laut PLTNT tersebut. Prinsip dan aturan hukum laut akan

memberikan panduan dalam hal itu. Oleh karena itu, diharapkan bahwa negara-negara yang terlibat perlu diundang untuk mempertimbangkan isu-isu yang berkaitan dengan transit dan navigasi PLTNT di laut.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih kami sampaikan ke Kepala Pusat Kajian Sistem Energi Nuklir yang telah memberikan ruag dalam penelitian ini, khususnya kepada Kepala Bidang Kajian Data Tapak tempat Penulis berada. Kami juga mengucapkan terima kasih kepada Biro Hukum Humas dan Kerjasama BATAN yang telah membantu dalam penelitian tersebut.

#### DAFTAR PUSTAKA

1. ARS TECHNICA, "Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir Apung Pertama Dilepas ke Laut oleh Russia",  
<https://www.kaskus.co.id/thread/5ae85d6432e2e6023c8b4568/pembangkit-listrik-tenaga-nuklir-apung-pertama-dilepas-ke-laut-oleh-russia/>
2. W.J.F. Standring, M.Dowdall, I. Amundsen, P. Strand, "Floating Nuclear Power Enviroment", Marine Pollution Bulletin 58 (2009) 174-178
3. P.V. Thanggam Babu and D.V Reddy, "Exixting Methodologies in The Design and Analysis of Offshore Floating Nuclear Power Plants", Nuclear Engineering and Design 48 (1978) 167-205.
4. YOSEPH EDWIN, "PLTN Apung Rusia Siap Pasok Listrik Ke Area Terpencil",  
<https://beritagar.id/artikel/sains-teknopltn-apung-rusia-siap-pasok-listrik-ke-area-terpencil>
5. ACHMAD BINTORO, "Rusia Bikin Titanic Nuklir, Diklaim Bisa Atasi Krisis Listrik di Kawasan Terpencil, Seperti Kaltim?",  
<http://kaltim.tribunnews.com/2018/05/03/rusia-bikin-titanic-nuklir-diklaim-bisa-atasi-krisis-listrik-di-kawasan-terpencil-seperti-kaltim?page=2>
6. KUMPARANSAINS, "Rusia Siap Luncurkan PLTN Apung Pertama di Dunia",  
<https://kumparan.com/@kumparansains/rusia-siap-luncurkan-pltn-apung-pertama-di-dunia>
7. "Rusia Tawarkan Kapal Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir",  
<https://infonawacita.com/rusia-tawarkan-kapal-pembangkit-listrik-tenaga-nuklir/>
8. NURMAYANTI, "PLTN Terapung Satu-satunya di Dunia Siap Beroperasi",  
<https://www.liputan6.com/bisnis/read/3540201/pltn-terapung-satu-satunya-di-dunia-siap-beroperasi>
9. "B&W Unveils Modular Nuclear Power Design", 10 June 2009, [http://world-nuclear-news.org/NN-BandW\\_unveils\\_modular\\_reactor\\_design-1006095.html](http://world-nuclear-news.org/NN-BandW_unveils_modular_reactor_design-1006095.html)
10. "Small Modular Reactors: Nuclear Energy Market Potential for Near-term Deployment", © OECD 2016 NEA No. 7213 Nuclear Energy Agency Organisation For Economic Co-Operation And Development, <https://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2016/7213-smrs.pdf>
11. "SVBR-100:New Generation Nuclear Power Plants for Small and Medium-Sized Power Applications", JSC "AKME-engineering",  
<http://www.akmeengineering.com/assets/files/SVBR-100%20new%20generation%20power%20plants.pdf>
12. "SVBR-100", <http://www.akmeengineering.com/svbr100.html>
13. I.V. Dulera, A. Basak, P.P. Kelkar and R.K. Sinha, "Compact High Temperature Reactor (CHTR)", Reactor Engineering Division, Bhabha Atomic Research Centre,  
<http://www.barc.gov.in/publications/nl/2006/200610-22.pdf>
14. I.V. Dulera and R.K. Sinha,"The Indian High Temperature Reactor Programme", Reactor Engineering Division Bhabha Atomic Research Centre Mumbai, India, [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Meetings/PDFplus/2007/cn152/cn152p/Dulera\\_India\\_The\\_Indian\\_High\\_Temperature\\_Reactor\\_Programme.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Meetings/PDFplus/2007/cn152/cn152p/Dulera_India_The_Indian_High_Temperature_Reactor_Programme.pdf)
15. "Status report 77 - System-Integrated Modular Advanced Reactor (SMART)",  
<https://aris.iaea.org/PDF/SMART.pdf>
16. "Status of innovative small and medium sized reactor designs 2005",  
<https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/Public/37/052/37052826.pdf>
17. "Nuclear Power in Argentina, June 2018, <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/argentina.aspx>
18. V. Kuznetsov, N. Barkatullah, "Approaches to Assess Competitiveness of Small and Medium Sized Reactors", International Atomic Energy Agency, IAEA-CN-164-1S01,

[https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1500\\_CD\\_Web/htm/pdf/topic1/1S01\\_V.Kuznetsov.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1500_CD_Web/htm/pdf/topic1/1S01_V.Kuznetsov.pdf)

19. KANG-HEON LEE, et.all, "Recent Advances in Ocean Nuclear Power Plants", *Energies* 2015, 8, 11470-11492; doi:10.3390/en81011470
20. "Legal and Institutional Issues of Transportable Nuclear Power Plants: A Preliminary Study", IAEA Nuclear Energy Series, No.NG-T-3.5, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2013.
21. Undang Undang Republik Indonesia Nomor 10 tahun 1997 tentang Ketenaganukliran
22. Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 2 tahun 2014 tentang Perizinan Instalasi Nuklir dan Pemanfaatan Bahan Nuklir
23. Undang Undang Republik Indonesia Nomor 17 tahun 2008 tentang Pelayaran
24. Peraturan Pemerintah Nomor 58 tahun 2015 tentang Pengangkutan Zat Radioaktif
25. Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 6 Tahun 2016 tentang Keamanan Sumber Radioaktif

#### **DISKUSI/TANYA JAWAB :**

##### **1. PERTANYAAN :**

Apakah sudah diasumsikan kecelakaan PLTNT di Indonesia, mengingatkan kondisi laut di Indonesia berbeda dengan kondisi laut di Rusia yang lebih tenang.

##### **JAWABAN :**

Dalam Undang-Undang Pelayaran, hal-hal yang terkait dengan keselamatan pelayaran sudah tertuang, diantaranya garis muat, pemuatan, manajemen keselamatan, pencegahan pencemaran, dll, maka sudah diantisipasi. Untuk PLTNT tentunya ada persyaratan tambahan terkait bahan-bahan nuklir yang ada dalam kapal.

##### **2. PERTANYAAN :**

Apakah dalam peraturan internasional terkait PLTNT sudah ada dan bagaimana kajiannya?

##### **JAWABAN :**

PLTN berbentuk kapal, yang tentunya akan dapat berpindah dari satu tempat ke tempat lain dari Negara satu ke Negara lain, hal ini tentunya akan tunduk pada hukum internasional, terlebih bila PLTNT melakukan transit di satu Negara. maka ada peraturan-peraturan terkait hal tersebut. Disamping itu tunduk juga pada peraturan berhubungan dengan lingkungan.

##### **3. PERTANYAAN :**

- Sebagai masukan, per definisi di PP2/2014 tapak merupakan tempat di darat untuk membangun instalasi nuklir. Untuk melengkapi PLTN terapung, masukan apa yang terkait definisi tapak?
- PLTN terapung disamping memenuhi persyaratan keselamatan instalasi nuklir, juga harus memenuhi persyaratan keselamatan perkapalan. Apakah peraturan terkait dengan persyaratan keselamatan perkapalan, peraturan di Indonesia sudah mencukupi?

##### **JAWABAN :**

- Perlu dipikirkan pengembangan atau antisipasi ke depan bahwa tapak PLTN tidak hanya di darat, untuk defisini secara definitive perlu dibahas yang mendalam dengan intansi terkait.
- Untuk persyaratan keselamatan perkapalan yang saat ini sudah mengatur segala kemungkinan terhadap keselamatan perkapalan. Namun bila diaplikasikan dalam PLTNT seyogyanya juga disuport dengan peraturan-peraturan lain terkait dengan pemuatan bahan nuklir.

## TINJAUAN ANALISIS KEKRITISAN DALAM REVISI PERATURAN KEPALA BAPETEN NOMOR 10 TAHUN 2006

**Catur Febriyanto S.**

*Badan Pengawas Tenaga Nuklir, Jl. Gajah Mada no. 8, Jakarta Pusat 10120*

*email: [c.febriyanto@bapeten.go.id](mailto:c.febriyanto@bapeten.go.id)*

### ABSTRAK

**TINJAUAN ANALISIS KEKRITISAN DALAM REVISI PERATURAN KEPALA BAPETEN NOMOR 10 TAHUN 2006.** Pada Tahun 2018, BAPETEN sedang merevisi Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 10 Tahun 2006 tentang Pedoman Penyusunan Laporan Analisis Keselamatan Instalasi Nuklir Nonreaktor. Hingga saat ini substansi di dalam laporan analisis keselamatan (LAK) pada bab terkait pencegahan kekritisan belum menguraikan secara rinci tahapan dalam melakukan analisis kekritisan. Dengan diterbitkannya dokumen standar IAEA, maka perlu disesuaikan dengan perkembangan standar internasional saat ini, serta dapat mengacu pula ke dokumen-dokumen lain yang diterbitkan oleh negara lain. Tujuan penulisan adalah untuk mengetahui kesesuaian substansi di dalam bab yang terkait dengan keselamatan kekritisan sekaligus memberikan rekomendasi hal apa saja yang perlu dimuat di dalam revisi PerKa tersebut. Metode yang digunakan adalah studi komparasi melalui identifikasi kesesuaian substansi antara substansi di dalam peraturan tersebut dengan standar internasional, baik yang diterbitkan oleh IAEA maupun dari negara lain. Hasil tinjauan menunjukkan bahwa perlu adanya perbaikan melalui penyesuaian terhadap substansi-substansi dari dokumen baik yang diterbitkan oleh IAEA maupun negara lain, sehingga sejalan dengan perkembangan standar internasional saat ini.

Kata kunci: regulasi, analisis kekritisan, laporan analisis keselamatan, instalasi nuklir nonreaktor.

### ABSTRACT

**REVIEW ON CRITICAL ANALYSIS IN THE REVISION OF BAPETEN CHAIRMAN REGULATION NUMBER 10 YEAR 2006.** In 2018, BAPETEN is revising BAPETEN Chairman Regulation No. 10 Year 2006 on Guidelines for Preparation of Nonreactor Nuclear Installations Safety Analysis Report. Until now the substance in the safety analysis report (SAR), with regard to the chapter related to criticality prevention has not been elaborated in detail related to the steps in conducting criticality analysis. With the issuance of the IAEA standard document, the document needs to be adjusted to the development of current international standards, and can also refer to other documents issued by other countries. The purpose of study is to determine the conformity of the substance in the chapter related to criticality safety and providing recommendations on the substances that have to be included in the revision of the BAPETEN Chairman Regulation. The method used is a comparative study through the identification of the conformity of the substances between the substances in the BAPETEN Chairman Regulation and international standards, both issued by the IAEA and from other countries. The result of the study shows that there is a need for improvement through adjustments to the substances of the documents both issued by the IAEA and other countries, so that it is in line with the development of current international standards.

Keyword: regulation, criticality analysis, safety analysis report, non-reactornuclear installation

### PENDAHULUAN

Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN) sebagai lembaga pemerintah yang bertanggung jawab dalam pengawasan ketenaganukliran mempunyai tupoksi yang salah satunya adalah menerbitkan berbagai peraturan terkait dengan keselamatan, keamanan dan *safeguard* (3S) yang harus dipatuhi oleh pemegang izin seperti Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 10 Tahun 2006 tentang Pedoman Penyusunan Laporan Analisis Keselamatan Instalasi Nuklir Nonreaktor. Peraturan Kepala BAPETEN (PerKa) tersebut bertujuan untuk memberikan pedoman bagi para pemohon izin pembangunan dan pengoperasian Instalasi Nuklir Nonreaktor (INNR) dalam penyusunan dokumen Laporan Analisis Keselamatan (LAK)

yang digunakan sebagai salah satu dokumen persyaratan izin. LAK dapat bertindak sebagai dokumen komunikasi teknis utama antara BAPETEN dengan pemohon izin. LAK memuat analisis keselamatan suatu instalasi berdasarkan potensi bahaya internal dan eksternal untuk melindungi instalasi terhadap bahaya tersebut [1].

Tahun 2018, BAPETEN sedang merevisi PerKa tersebut guna menyelaraskan landasan hukum setelah diterbitkannya Peraturan Pemerintah Nomor 54 Tahun 2012 tentang Keselamatan dan Keamanan Instalasi Nuklir, dan Peraturan Pemerintah Nomor 2 Tahun 2014 tentang Perizinan Instalasi Nuklir dan Pemanfaatan Bahan Nuklir, serta mengikuti perkembangan standar internasional saat ini. Di dalam PerKa tersebut memuat format dan isi dalam penyusunan dokumen LAK yang terdiri dari 18 bab. Di dalam tulisan ini akan ditekankan pada pembahasan mengenai bab terkait pencegahan kekritisitas, yaitu Bab 10. Tujuan keselamatan kekritisitas adalah untuk mencegah reaksi berantai nuklir dan untuk meminimalkan konsekuensinya apabila terjadi. Bila diamati, uraian di dalam bab tersebut belumlah secara rinci menguraikan tahapan-tahapan dalam analisis kekritisitas. Hasil dari analisis kekritisitas tentunya akan dijadikan dasar dalam menentukan apakah tingkat keselamatan telah tercapai, dan pendokumentasian batas dan kondisi dan tindakan keselamatan yang diperlukan untuk mencegah kecelakaan kekritisitas. Dengan diterbitkannya dokumen standar IAEA mengenai *criticality safety in the handling of fissile material* (SSG-27), muatan di dalam dokumen tersebut dapat dijadikan acuan dalam merevisi bab di dalam PerKa tersebut sehingga selaras dengan dokumen standar IAEA dan tidak menutup kemungkinan dengan dokumen standar dari negara lain.

Metode yang digunakan dalam tulisan ini adalah studi komparasi melalui identifikasi kesesuaian substansi antara substansi di dalam peraturan tersebut dengan standar internasional, baik yang diterbitkan oleh IAEA maupun dari negara lain. Sedangkan tujuan penulisan adalah untuk mengetahui kesesuaian substansi di dalam bab yang terkait dengan keselamatan kekritisitas sekaligus memberikan rekomendasi hal apa saja yang perlu dimuat di dalam revisi PerKa tersebut.

## **POKOK BAHASAN**

Pencegahan kekritisitas dilakukan berdasarkan analisis semua kejadian awal yang relevan terhadap keselamatan kekritisitas yang timbul dari kondisi abnormal, termasuk kesalahan manusia, bahaya internal dan eksternal, dan kehilangan atau kegagalan struktur, sistem dan komponen yang penting untuk keselamatan baik dalam operasi normal, kejadian operasi terantisipasi, maupun kecelakaan dasar desain. Berikut penjelasan singkat dari muatan substansi yang ada di PerKa tersebut dengan standar internasional:

### **1. Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 10 Tahun 2006**

Di dalam uraian Bab 10 PerKa BAPETEN Nomor 10 tahun 2006, pencegahan kekritisitas, lampiran peraturan tersebut dibagi dua subbab judul, yaitu analisis kekritisitas dan pengendalian kekritisitas. Analisis kekritisitas menguraikan analisis mengenai parameter kekritisitas dan batasan yang harus ditentukan untuk pencegahan kekritisitas.

Subbab pengendalian kekritisitas menguraikan batas desain keselamatan kekritisitas nuklir dan setiap kriteria desain yang digunakan untuk menjamin konfigurasi subkritis pada kondisi normal, abnormal, dan kecelakaan. Di dalam subbab ini dibagi pula mengenai pengendalian teknis, pengendalian administrasi, serta prinsip kontingensi ganda. Pengendalian teknis menguraikan batas desain keselamatan nuklir yang dikendalikan secara pasif maupun aktif, dan dasar desain peralatan atau operasi peralatan. Disamping itu pula, diuraikan tentang penggunaan geometri, pengaturan jarak dan pengendalian kekritisitas lain.

Sedangkan pengendalian administrasi menguraikan kendali administrasi yang dilakukan untuk mencegah kecelakaan kekritisitas, serta penilaian dan persetujuan terhadap perubahan proses atau konfigurasi sistem. Terakhir adalah prinsip kontingensi ganda yang menguraikan metode untuk menjamin bahwa diperlukan sekurang-kurangnya lebih dari satu kebolehdijadian perubahan independensi dan serta kondisi proses sebelum terjadi kecelakaan kekritisitas.

### **2. Dokumen Standar IAEA**

Dalam melakukan revisi PerKa ini khususnya Bab 10, pencegahan kekritisitas, digunakan dokumen standar IAEA mengenai keselamatan kekritisitas dalam penanganan bahan fisil (SSG-27) [4]. Dokumen standar tersebut terdiri dari enam bab, namun hanya ada

tiga bab yang relevan dengan revisi PerKa untuk Bab 10 tersebut. Adapun ketiga bab tersebut adalah pendekatan untuk menjamin keselamatan kekritisan, tindakan untuk menjamin keselamatan kekritisan, dan kajian keselamatan kekritisan.

Pendekatan untuk menjamin keselamatan kekritisan menguraikan kriteria keselamatan dan margin keselamatan yang digunakan untuk menentukan batas keselamatan operasi instalasi nuklir nonreaktor. Adapun kriteria keselamatan dapat berdasarkan salah satu dari dua kriteria, yaitu nilai  $k_{eff}$  dan nilai kritis satu atau lebih faktor kekritisan, seperti massa, volume, konsentrasi, geometri, moderasi, pantulan, interaksi, komposisi dan densitas isotopik, dan memperhatikan produksi, kebocoran, hamburan dan serapan neutron. Sedangkan margin keselamatan yang diterapkan berdasarkan nilai  $k_{eff}$  kurang dari satu dan/atau faktor kekritisan di bawah nilai kritisnya. Dalam melakukan perhitungan margin keselamatan dipertimbangkan ketidakpastian dan sensitivitas sehubungan dengan perubahan faktor kekritisan.

Selanjutnya, tindakan untuk menjamin keselamatan kekritisan menguraikan tindakan yang dilakukan untuk menjamin subkritis sistem pada saat penanganan, pemrosesan, penggunaan dan penyimpanan bahan fisil. Dalam melakukan tindakan tersebut, prinsip kontingensi ganda dapat diterapkan. Bagian ini dibagi lagi menjadi:

- tindakan keselamatan teknis, yang menguraikan rekayasa pasif dan aktif yang memadai untuk mempertahankan kondisi subkritis;
- tindakan keselamatan administrasi, yang menguraikan kendali administrasi yang dilakukan untuk mencegah kecelakaan kekritisan, seperti prosedur;
- prinsip kontingensi ganda, yang mencakup prinsip kontingensi ganda yang memastikan bahwa kekritisan hanya dapat terjadi apabila paling sedikit terdapat dua perubahan independen (yang tidak disebabkan oleh kegagalan dengan penyebab sama) dan probabilitas kejadian untuk tiap perubahan cukup rendah.

Terakhir, kajian keselamatan kekritisan menguraikan penentuan tingkat keselamatan yang mencukupi telah tercapai, dan untuk pendokumentasian batas dan kondisi dan tindakan keselamatan yang diperlukan untuk mencegah kecelakaan kekritisan. Adapun pendekatan sistematis terhadap kajian keselamatan kekritisan dapat mengikuti langkah-langkah sebagai berikut:

- penentuan bahan fisil, yang menguraikan karakteristik bahan fisil mencakup massa, volume, moderasi, komposisi isotopik, pengayaan, deplesi penyerap, derajat produksi produk fisi atau pertumbuhan dan interaksi, transmudasi iradiasi bahan fisi, hasil peluruhan radioaktif;
- penentuan aktivitas yang melibatkan bahan fisil, yang menguraikan penentuan batas dan kondisi operasi aktivitas yang melibatkan bahan fisil, disertai pula deskripsi operasi instalasi yang mencakup sistem, proses, dan antarmuka yang relevan.
- metodologi kajian keselamatan kekritisan, yang menguraikan identifikasi kejadian awal yang dapat menimbulkan kejadian operasi terantisipasi atau kecelakaan dasar desain. Skenario urutan kejadian awal dapat disusun dengan menggunakan metode *what-if*, *hazard and operability* (HAZOP), *failure mode and effect* (FMEA), *fault tree*, dan/atau *bayesian network*.
- verifikasi dan validasi metode perhitungan dan verifikasi data nuklir, yang menguraikan metode perhitungan, seperti kode komputer, dan data nuklir yang digunakan dalam analisis keselamatan kekritisan untuk menghitung  $k_{eff}$  harus diverifikasi guna menjamin keakuratan nilai yang diperoleh dan menetapkan batasan kemampuannya, *code bias* dan derajat ketidakpastian.
- analisis keselamatan kekritisan, yang menguraikan penggunaan data *benchmark* untuk memberikan estimasi yang lebih baik dan untuk menunjukkan konsistensi hasil perhitungan. Disamping itu pula, analisis sensitivitas dan ketidakpastian digunakan untuk mengkaji kemampuserapan *benchmark* dan untuk menjamin margin keselamatan yang dapat diterima.

SSG-15 memberikan contoh batas dan kondisi operasi terkait subkritisitas untuk penyimpanan bahan bakar nuklir bekas yang mencakup kandungan maksimum  $Pu$  dan pengayaan bahan bakar nuklir segar yang diperbolehkan, konsentrasi minimum racun neutron di dalam penyerap yang diperbolehkan, pembatasan pergerakan dan konfigurasi penyimpanan bahan bakar bekas, pembatasan penggunaan moderator, *burnup* bahan bakar bekas minimum, dan karakteristik perangkat bahan bakar bekas [5].

### 3. Dokumen Pedoman Negara Lain

Untuk mendapatkan tinjauan yang lebih komprehensif, penulis mencoba membandingkan dokumen pedoman dari negara lain. Adapaun dokumen yang digunakan adalah Reg. Guide 3.48 yang diterbitkan oleh US-NRC [1]. Namun hanya sedikit yang dibahas terkait keselamatan kekritisitas nuklir di dalam dokumen tersebut. Subbab keselamatan kekritisitas nuklir menguraikan semua kriteria terkait dengan margin keselamatan yang sesuai untuk menjamin subkritisitas untuk semua waktu, baik untuk penyimpanan pasif maupun untuk penanganan. Adapun pokok bahasan yang dimuat di dalam subbab tersebut, pertama adalah metode kendali untuk pencegahan kekritisitas yang menguraikan metode yang digunakan untuk menjamin keadaan subkritisitas dipertahankan dalam kondisi terburuk. Kedua, kriteria kontingensi kesalahan (*error contingency criteria*) yang menguraikan kriteria kontingensi kesalahan yang dipilih untuk mendukung informasi di atas. Terakhir adalah analisis verifikasi yang memuat kriteria untuk menentukan verifikasi model atau program yang digunakan dalam analisis.

Sedangkan dokumen pedoman lainnya adalah dokumen DOE-STD-3007-93 yang diterbitkan oleh US-DOE yang memberikan pedoman terkait format dan isi evaluasi keselamatan kekritisitas yang terdiri dari sembilan bab [2]. Namun di antara kesembilan bab tersebut, hanya ada empat bab yang relevan dengan revisi PerKa untuk Bab 10 tersebut. Adapun penjelasan dari keempat bab-bab tersebut adalah sebagai berikut, pertama adalah metodologi, bab ini menguraikan metode yang digunakan untuk penentuan nilai-nilai subkritisitas yang dapat diterima dan menunjukkan bahwa pada saat pengoperasian nilai-nilai tersebut tidak dilampaui. Adapun metode yang digunakan adalah melalui acuan standar nasional yang memberikan batasan subkritisitas, melalui acuan buku pegangan yang secara luas diterima mengenai batasan subkritisitas, melalui acuan eksperimen dengan penyesuaian yang mempertimbangkan ketidakpastian, dan melalui teknik perhitungan tervalidasi.

Kedua adalah kontingensi yang menguraikan minimal dua kejadian yang memiliki kemungkinan kecil dan independen yang dapat terjadi secara bersamaan sebelum kekritisitas terjadi. Uraian lainnya adalah apabila kendali dua parameter yang independen tidak dapat diterapkan, memungkinkan sistem multipel mengendalikan suatu parameter tunggal. Ketiga adalah evaluasi dan hasil yang menguraikan teknik perhitungan yang digunakan, disertai deskripsi rinci model dan dilengkapi dengan gambar serta dimensi model. Asumsi dan penyederhanaan juga diuraikan. Untuk melakukan perhitungan dengan menggunakan program komputer perlu diuraikan pula material dan komposisinya, pustaka nuklida yang digunakan, serta *typical input listing*. Disamping itu pula, uraian ketidakpastian dalam metodologi dan sensitivitasnya terhadap penyederhanaan model harus disertakan.

Selanjutnya yang terakhir adalah fitur desain (pasif dan aktif), serta batasan dan persyaratan yang dikendalikan secara administrasi menguraikan tujuan pencegahan atau pengurangan probabilitas kekritisitas.

### METODOLOGI

Metodologi yang digunakan dalam tulisan ini adalah studi komparasi melalui identifikasi kesesuaian substansi antara substansi di dalam PerKa dengan standar internasional, baik yang diterbitkan oleh IAEA maupun dari negara lain.

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari Tabel 1 terlihat bahwa secara umum Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 10 Tahun 2006 dan dokumen IAEA SSG-27 terdapat perbedaan tahapan dalam melakukan analisis kekritisitas. Seperti dijelaskan di pendahuluan bahwa PerKa ini bertujuan untuk memberikan pedoman bagi para pemohon izin pembangunan dan pengoperasian Instalasi Nuklir Nonreaktor (INNR) dalam penyusunan dokumen LAK. Oleh karena itu, diharapkan PerKa tersebut harus secara jelas memberikan pedoman ke pemohon izin, sehingga pemohon izin mendapatkan gambaran hal apa saja yang harus dilakukan saat pengajuan izin. Hal tersebut juga diharapkan akan mempermudah BAPETEN dalam hal evaluasi permohonan izin, karena dengan demikian evaluator memiliki landasan hukum apabila terdapat kekurangan persyaratan-persyaratan.

Adapun rekomendasi dari penulis melalui tulisan ini adalah perlu ditambahkan bagian terkait pendekatan untuk menjamin keselamatan kekritisitas. Karena bagian ini menguraikan kriteria keselamatan dan margin keselamatan yang digunakan untuk menentukan batas keselamatan operasi INNR. Adapun kriteria keselamatan sebagaimana dijelaskan di dalam pokok bahasan yang mengacu pada dokumen IAEA SSG-27, yaitu berdasarkan nilai  $k_{eff}$  dan

nilai faktor kekritisan yang mencakup massa, volume, konsentrasi, geometri, moderasi, pantulan, interaksi, komposisi dan densitas isotopik, dan memperhatikan produksi, kebocoran, hamburan dan serapan neutron. Sedangkan metode yang digunakan dalam penentuan nilai  $k_{eff}$  dan nilai faktor kekritisan untuk sistem atau proses yang diajukan dapat mengikuti sebagaimana di dalam dokumen DOE-STD-3007-93 yang didapat melalui standar nasional, buku pegangan yang secara luas diterima mengenai batasan subkritis, eksperimen yang mempertimbangkan ketidakpastian dan teknik perhitungan tervalidasi.

Tabel 1. Perbandingan dalam melakukan analisis kekritisan antar referensi.

PerKa No. 10/2006	SSG-27 IAEA	DOE-STD-3007-93	Reg. Guide 3.48
	<b>Pendekatan untuk menjamin keselamatan kekritisan</b>	<b>Metodologi</b>	
<b>Analisis kekritisan</b>	<b>Kajian keselamatan kekritisan</b>	<b>Evaluasi dan hasil</b>	
	<i>Penentuan bahan fisil</i>		
	<i>Penentuan aktivitas yang melibatkan bahan fisil</i>		
	<i>Metodologi kajian keselamatan kekritisan</i>		
	<i>Verifikasi dan validasi metode perhitungan dan verifikasi data nuklir</i>		<b>Analisis verifikasi</b>
<i>Analisis keselamatan kekritisan</i>			
<b>Pengendalian kekritisan</b>	<b>Tindakan untuk menjamin keselamatan kekritisan</b>		<b>Metode kendali untuk pencegahan kekritisan</b>
<i>Pengendalian teknis</i>	<i>Tindakan keselamatan teknis</i>	<b>Fitur desain (pasif &amp; aktif) dan batasan &amp; persyaratan yang dikendalikan secara administrasi</b>	
<i>Pengendalian administrasi</i>	<i>Tindakan keselamatan administrasi</i>		
<i>Prinsip kontingensi ganda</i>	<i>Prinsip kontingensi ganda</i>	<b>Kontingensi</b>	<b>Kriteria kontingensi kesalahan (<i>error contingency criteria</i>)</b>

Rekomendasi lainnya adalah terkait dengan kajian keselamatan kekritisan di SSG-27 atau analisis kekritisan di PerKa tersebut. Di uraian pokok bahasan dan Tabel 1 terlihat bahwa uraian di dalam PerKa tersebut belum begitu rinci sebagaimana uraian di dalam dokumen IAEA SSG-27 yang berupa tahapan-tahapan yang harus dilakukan oleh pemohon izin, dari penentuan bahan fisil, penentuan aktivitas yang melibatkan bahan fisil, metodologi kajian keselamatan kekritisan, dan analisis keselamatan kekritisan. Karena hasil dari kajian keselamatan kekritisan ini dapat dijadikan dasar dalam penentuan tingkat keselamatan apakah telah tercapai, dan pendokumentasian batas dan kondisi dan tindakan keselamatan yang diperlukan untuk mencegah kecelakaan kekritisan. Adapun substansi di dalam dokumen DOE-STD-3007-93 dapat ditambahkan terkait dengan deskripsi rinci model yang disertai dengan gambar model dimensi. Selain itu pula perlu diuraikan material dan komposisinya, pustaka nuklida yang digunakan, serta *typical input listing*. Hal ini perlu ditambahkan karena saat dilakukan evaluasi, tentunya evaluator BAPETEN akan menggunakan program komputer lainnya yang telah tervalidasi, sehingga hasil perhitungan dari pemohon izin dapat dipertanggungjawabkan. Karena kajian keselamatan kekritisan ini

menggunakan program komputer, tentunya perlu juga diuraikan asumsi dan penyederhanaan yang digunakan dalam perhitungan.

Rekomendasi yang terakhir adalah perlunya memperjelas uraian prinsip kontingensi ganda. Di dalam PerKa tersebut, uraian terkait dengan prinsip kontingensi ganda belumlah jelas. Adapun uraian dalam PerKa tersebut adalah diperlukan sekurang-kurangnya lebih dari satu kebolehjadian perubahan independensi dan setara kondisi proses sebelum terjadi kecelakaan kekritisitas. Hal ini sedikit berbeda dengan uraian yang ada di dalam dokumen IAEA SSG-27 yang menjelaskan bahwa dalam prinsip kontingensi ganda, kekritisitas dapat terjadi apabila dua perubahan terjadi secara bersamaan yang mencakup dua perubahan independen (yang tidak disebabkan oleh kegagalan dengan penyebab sama) dan probabilitas kejadian untuk tiap perubahan cukup rendah. Kesesuaian dengan prinsip kontingensi ganda dilakukan dengan beberapa metode yang berbeda untuk mempermudah analisis kontingensi seperti yang ditunjukkan berikut ini [2]:

1. Daftar kejadian dengan probabilitas kecil dan independen, sekurang-kurangnya dua kejadian terjadi secara bersamaan sebelum kecelakaan kekritisitas. Deskripsi kendali, kondisi, dan sebagainya yang menjamin bahwa tidak ada kegagalan tunggal yang mengakibatkan kekritisitas. Tabel 2 memberikan contoh tersebut.

Tabel 2. Daftar kejadian dengan probabilitas kecil dan independen.

Kontingensi		Penghalang ( <i>barrier</i> )
No.	Deskripsi	
1.	Kejadian dengan probabilitas kecil #1	Kendali, kondisi, dan sebagainya yang menyebabkan kejadian #1 probabilitas kecil
2.	Kejadian dengan probabilitas kecil #2	Kendali, kondisi, dan sebagainya yang menyebabkan kejadian #2 probabilitas kecil

2. Jika kendali dari dua faktor kekritisitas tidak dapat diterapkan, diperbolehkan sistem multi-kendali (minimal dua) pada faktor kekritisitas tunggal. Kemungkinan keseluruhan dari kegagalan kendali yang bersamaan harus dapat dibandingkan dengan dua kejadian dengan probabilitas yang kecil seperti yang diuraikan di dalam metode 1. Tabel 3 memberikan contoh tersebut.

Tabel 3. Faktor kekritisitas dengan sistem multi-kendali.

Faktorkekritisitas	Kendali	
	No.	Deskripsi
Faktor kekritisitas	1.	Deskripsi kendali #1
	.	
	.	
	N.	Deskripsi kendali #N

## KESIMPULAN

Dari uraian di atas dapat dilihat bahwa Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 10 Tahun 2006 tentang Pedoman Penyusunan Laporan Analisis Keselamatan Instalasi Nuklir Nonreaktor di dalam bab terkait pencegahan kekritisitas perlu dilakukan penyesuaian terhadap substansi-substansi yang ada di dalam bab tersebut. Peninjauan tersebut dilakukan melalui penyesuaian terhadap substansi-substansi dari dokumen baik yang diterbitkan oleh IAEA maupun negara lain, sehingga substansi-substansi di dalam PerKa tersebut sejalan dengan perkembangan standar internasional saat ini. Karena PerKa ini merupakan suatu pedoman, maka ketentuan di dalam PerKa tersebut haruslah jelas. Dengan demikian, diharapkan pemohon izin dalam melakukan analisis dapat menyesuaikan dengan persyaratan-persyaratan di dalam peraturan yang berlaku. Sedangkan untuk evaluator BAPETEN, diharapkan dapat dijadikan landasan hukum apabila terdapat kekurangan dalam pemenuhan persyaratan-persyaratan ketentuan di dalam PerKa tersebut.

**DAFTAR PUSTAKA**

1. Regulatory Guide 3.48, "Standard Format and Content for the Safety Analysis Report for An Independent Spent Fuel Storage Installation or Monitored Retrievable Storage Installation (Dry Storage)", US-NRC, Agustus, Washington, D.C. (1989).
2. DOE-STD-3007-93, "Guidelines for Preparing Criticality Safety Evaluations at Department of Energy Non-Reactor Nuclear Facilities", US-DOE, September, Washington, D.C. (1998).
3. Peraturan Kepala BAPETEN, "Pedoman Penyusunan Laporan Analisis Keselamatan Instalasi Nuklir Nonreaktor", PerKa BAPETEN No. 10 Tahun 2006, BAPETEN, Jakarta (2006).
4. SSG-27, "Criticality Safety in the Handling of Fissile Material", IAEA, Mei, Vienna (2014).
5. SSG-15, "Storage of Spent Nuclear Fuel", IAEA, Februari, Vienna (2012).

Halaman ini sengaja di kosongkan

## **IDENTIFIKASI PENGEMBANGAN PERATURAN BAPETEN MENGENAI KESELAMATAN RADIASI DALAM PENGGUNAAN IRADIATOR**

**Hermawan Puji Yuwana<sup>1</sup>, Chrisantus Aristo Wirawan Dwipayana<sup>2</sup>**

*<sup>1,2</sup> Direktorat Pengaturan Pengawasan Fasilitas Radiasi dan Zat Radioaktif – BAPETEN  
Jl. Gajah Mada No. 8 Jakarta Pusat 10120  
email: h.puji@bapeten.go.id*

### **ABSTRAK**

**IDENTIFIKASI PENGEMBANGAN PERATURAN BAPETEN MENGENAI KESELAMATAN RADIASI DALAM PENGGUNAAN IRADIATOR.** PP Nomor 29 Tahun 2008 tentang Perizinan Pemanfaatan Sumber Radiasi Pengion dan Bahan Nuklir membagi kegiatan pemanfaatan menjadi 3 kelompok yaitu kelompok A, B dan C, salah satunya adalah kegiatan penggunaan dan/atau penelitian dan pengembangan dalam iradiator. Iradiator dikategorikan menjadi iradiator kategori I, II, III, dan IV, baik yang menggunakan menggunakan zat radioaktif terbungkus atau pembangkit radiasi pengion. Tinjauan bertujuan untuk mengidentifikasi persyaratan pengaturan yang diperlukan sebagai bahan pengembangan Peraturan BAPETEN mengenai keselamatan radiasi dalam penggunaan iradiator. Lingkup pengaturan mengatur tentang persyaratan izin, persyaratan keselamatan radiasi, rekaman, dan laporan dalam penggunaan iradiator. Persyaratan izin mengatur tentang mekanisme untuk mendapatkan izin dan mekanisme perpanjangan izin. Sedangkan persyaratan keselamatan radiasi mengatur tentang persyaratan manajemen, proteksi dan keselamatan radiasi, teknik, dan verifikasi keselamatan. Persyaratan manajemen menjelaskan tugas dan tanggung jawab personil dalam pemanfaatan iradiator seperti pemegang izin, petugas proteksi radiasi, petugas dosimeter, petugas perawatan, dan operator. Penerapan proteksi dan keselamatan radiasi sesuai dengan prinsip justifikasi, limitasi dosis, dan optimisasi proteksi dan keselamatan radiasi. Persyaratan teknik menjelaskan fasilitas iradiator yaitu bangunan iradiator, akses ke ruang iradiasi, ruang kendali, ruang iradiasi, perisai radiasi, modul dan rak zat radioaktif, sistem ventilasi, sistem pemadam kebakaran, sistem penggerak rak zat radioaktif, sistem kondisioning air, dan sistem kolam. Verifikasi keselamatan dilakukan untuk memastikan bahwa fitur keselamatan memenuhi kriteria keberterimaan melalui pengujian parameter keselamatan secara berkala.

Kata kunci: pengembangan, iradiator, persyaratan, izin, keselamatan radiasi.

### **ABSTRACT**

**IDENTIFICATION OF THE DEVELOPMENT OF BAPETEN REGULATIONS ON THE RADIATION SAFETY IN THE USE OF IRRADIATORS.** Government Regulation Nr. 29 Year 2008 on Licensing of the Utilization of Ionizing Radiation Sources and Nuclear Materials is dividing the utilization activities into 3 groups: group A, B and C, one of which is the use and/or research and development in the irradiator. Irradiators are categorized into category I, category II, category III, and category IV, either using a sealed radioactive source or an ionizing radiation generators. This review aims to identify the regulatory requirements required for the development of BAPETEN Regulation. The scope of the regulation is license requirements, radiation safety requirements, recording, and reporting on the use of irradiators. The license requirements arrange the mechanism to obtaining licenses and license renewal. Radiation safety requirements consist of the requirements of management, radiation protection and safety, technical, and verification of safety. Requirement of management requirements describe the responsibilities involved in irradiator utilization such as license holders, radiation protection officers, dosimeter officers, maintenance workers, and operators. Implementation of radiation protection and safety in accordance with the principles of justification, dose limitation, and optimization of radiation protection and safety. Technical requirements describe irradiator facilities such as irradiator buildings, access to the radiation rooms, control rooms, radiation room, shielding, radioactive rack and modules, ventilation systems, fire protection systems, source hoist system, water treatment systems, and storage pool. Safety verification is performed to ensure that the safety features run according to the acceptability criteria through periodic safety parameter testing.

Keyword: development, irradiator, requirements, license, radiation safety.

## PENDAHULUAN

Pengawasan pemanfaatan tenaga nuklir termasuk dalam hal ini pemanfaatan sumber radiasi pengion dilaksanakan oleh Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN) melalui tiga pilar pengawasan, yaitu peraturan, perizinan, dan inspeksi [1]. Salah satu tujuan pengawasan adalah untuk menjamin keselamatan dan kesehatan pekerja dan anggota masyarakat serta perlindungan terhadap lingkungan hidup. Berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 29 Tahun 2008 tentang Perizinan Pemanfaatan Sumber Radiasi Pengion dan Bahan Nuklir, kegiatan pemanfaatan sumber radiasi pengion dikelompokkan menjadi 3 (tiga) yaitu kelompok A, kelompok B, dan kelompok C. Pengelompokan didasarkan pada resiko yang terkait dengan keselamatan radiasi dan keamanan sumber radioaktif dan bahan nuklir dengan mempertimbangkan potensi bahaya radiasi, tingkat kerumitan fasilitas, jumlah dan kompetensi personil yang bekerja, potensi dampak kecelakaan radiasi dan potensi ancaman terhadap sumber radioaktif. Salah satu pemanfaatan yang masuk ke dalam kelompok A adalah kegiatan penggunaan dan/atau penelitian dan pengembangan dalam iradiator yang terbagi menjadi iradiator kategori I, II, III, dan IV baik yang menggunakan zat radioaktif terbungkus maupun pembangkit radiasi pengion [2]. Pemanfaatan iradiator mengambil peran yang cukup penting baik di bidang industri maupun kesehatan.

Pengaturan terhadap iradiator telah ada sejak tahun 1999 dengan telah terbitnya Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 11/Ka-BAPETEN/VI-99 tentang Izin Konstruksi dan Operasi Iradiator. Dengan melihat usia peraturan yang sudah cukup lama, perlu dilakukan peninjauan kembali terhadap peraturan tersebut sesuai dengan perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi serta perkembangan rekomendasi dari IAEA. Pada tahun 2010 IAEA telah menerbitkan rekomendasi terkait dengan iradiator dalam dokumen *Specific Safety Guide 8 on Radiation Safety of Gamma, Electron and X Ray Irradiation Facilities* (SSG 8). Tinjauan ini bertujuan untuk mengidentifikasi persyaratan pengaturan yang diperlukan sebagai bahan untuk melakukan pengembangan Peraturan BAPETEN mengenai keselamatan radiasi dalam penggunaan iradiator.

## POKOK BAHASAN

Beberapa tantangan yang muncul dalam implementasi Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 11/Ka-BAPETEN/VI-99 diantaranya adalah:

1. Acuan peraturan yang lebih tinggi (peraturan pemerintah) dalam mengamankan pengaturan terhadap iradiator.  
Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 11/Ka-BAPETEN/VI-99 merupakan peraturan pelaksana dari PP Nomor 12 Tahun 1975 tentang Izin Pemakaian Zat Radioaktif dan atau Sumber Radiasi Lainnya. Kemudian PP Nomor 12 Tahun 1975 di amandemen menjadi PP Nomor 64 Tahun 2000 tentang Perizinan Pemanfaatan Tenaga Nuklir. PP Nomor 64 Tahun 2000 juga telah diamandemen menjadi PP Nomor 29 Tahun 2008 tentang Perizinan Pemanfaatan Sumber Radiasi Pengion dan Bahan Nuklir. Di dalam ketentuan peraturan perundangan, pada bagian "Bab Ketentuan Penutup" terdapat penjelasan bahwa pada saat "peraturan perundangan yang baru" mulai berlaku, maka semua peraturan perundang-undangan yang merupakan peraturan pelaksana dari "peraturan perundangan sebelumnya" dinyatakan masih tetap berlaku sepanjang tidak bertentangan dengan ketentuan "peraturan perundangan yang baru". Dengan adanya pengaturan yang tertuang dalam PP Nomor 29 Tahun 2008, terdapat beberapa ketentuan yang tidak terlingkupi dalam Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 11/Ka-BAPETEN/VI-99.
2. Konsep kategorisasi sumber radioaktif.  
Sebagaimana dijelaskan dalam PP Nomor 29 Tahun 2008, pemanfaatan iradiator masuk kedalam kelompok A. Iradiator dikategorikan menjadi kategori I (dengan pembangkit radiasi pengion atau zat radioaktif terbungkus), kategori II (dengan pembangkit radiasi pengion atau zat radioaktif terbungkus), kategori III (dengan zat radioaktif terbungkus), dan kategori IV (dengan zat radioaktif terbungkus). Sedangkan di dalam Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 11/Ka-BAPETEN/VI-99 menjelaskan iradiator tanpa adanya konsep kategorisasi sumber radioaktif.
3. Persyaratan administrasi dan teknis untuk memperoleh izin pemanfaatan.  
Setiap orang atau badan yang akan memanfaatkan tenaga nuklir wajib memiliki izin pemanfaatan tenaga nuklir dan memenuhi persyaratan keselamatan radiasi [3]. Pemenuhan terhadap persyaratan izin harus sesuai dengan ketentuan dalam PP Nomor 29 Tahun 2009 sedangkan pemenuhan keselamatan radiasi harus sesuai

dengan ketentuan dalam PP Nomor 33 Tahun 2007. Dalam melakukan revisi Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 11/Ka-BAPETEN/VI-99 harus dilihat kembali pola pengaturan sebagaimana diatur dalam 2 peraturan pemerintah tersebut yaitu PP Nomor 33 Tahun 2007 dan PP Nomor 29 Tahun 2008.

Tinjauan pengaturan persyaratan teknik dalam rangka pengembangan Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 11/Ka-BAPETEN/VI-99 dilakukan dengan metodologi kajian literatur melalui peraturan perundang-undangan terkait, standar/ rekomendasi dari IAEA, dan/atau praktik pengaturan yang berlaku disuatu negara. Kajian literatur dilakukan dengan mengidentifikasi peraturan Kepala BAPETEN terkait iradiator dan mengidentifikasi persyaratan pengaturan dalam rangka pengembangan peraturan BAPETEN tentang keselamatan radiasi dalam penggunaan iradiator.

**a. Identifikasi PP No. 29 Tahun 2008**

Persyaratan keselamatan radiasi sebagaimana diatur dalam PP Nomor 33 Tahun 2007 meliputi persyaratan manajemen, persyaratan proteksi radiasi, persyaratan teknik; dan verifikasi keselamatan. Sedangkan ketentuan perizinan diatur dalam PP Nomor 29 Tahun 2008 tentang Perizinan Pemanfaatan Sumber Radiasi Pengion dan Bahan Nuklir yang mengelompokkan iradiator masuk kedalam kelompok pemanfaatan A. Iradiator terbagi menjadi [2]:

1. Iradiator kategori I dengan zat radioaktif terbungkus;  
Iradiator kategori I dengan zat radioaktif terbungkus adalah iradiator dengan zat radioaktif terbungkus yang terkungkung dalam kontainer material padat dan berperisai radiasi sepanjang waktu, dan konfigurasi rancangannya tidak memungkinkan orang secara fisik mengakses zat radioaktif dan bagian yang diiradiasi.
2. Iradiator kategori I dengan pembangkit radiasi pengion;  
Iradiator kategori I dengan pembangkit radiasi pengion adalah iradiator jenis mesin berkas elektron yang berperisai radiasi dan dijaga agar orang tidak dapat mengakses mesin berkas elektron selama operasi dengan sistem kendali masuk.
3. Iradiator kategori II dan III dengan zat radioaktif terbungkus;  
Iradiator kategori II dengan zat radioaktif terbungkus adalah iradiator dengan zat radioaktif terbungkus yang terkungkung dalam kontainer kering, memiliki perisai saat tidak digunakan dan daerah yang diiradiasi dijaga agar tidak dapat diakses selama penggunaan dengan sistem kendali masuk, dan dapat diakses secara terkendali.  
Iradiator kategori III dengan zat radioaktif terbungkus adalah iradiator dengan zat radioaktif terbungkus yang terkungkung dalam kolam penyimpanan berisi air dan memiliki perisai sepanjang waktu, dan akses pada zat radioaktif terbungkus dan daerah yang diiradiasi dibatasi secara fisik dalam konfigurasi yang didesain dan mode penggunaan yang tepat.
4. Iradiator kategori II dengan pembangkit radiasi pengion; dan  
Iradiator kategori II dengan pembangkit radiasi pengion adalah iradiator jenis mesin berkas elektron yang ditempatkan dalam ruang berperisai radiasi, dan dijaga agar orang tidak dapat mengakses mesin berkas elektron selama operasi dengan sistem kendali masuk.
5. Iradiator kategori IV dengan zat radioaktif terbungkus.  
Iradiator kategori IV dengan zat radioaktif terbungkus adalah iradiator dengan zat radioaktif terbungkus yang terkungkung dalam kolam penyimpanan berisi air, memiliki perisai saat tidak digunakan dan daerah yang diiradiasi dijaga agar tidak dapat diakses selama penggunaan dengan sistem kendali masuk, dan dapat diakses secara terkendali.

Setiap orang atau badan yang akan melaksanakan pemanfaatan sumber radiasi pengion wajib memiliki izin dari Kepala BAPETEN. Untuk memperoleh izin pemanfaatan, maka pemohon harus memenuhi persyaratan yaitu administratif, teknis, dan/atau khusus. Pemenuhan terhadap persyaratan khusus ini hanya berlaku untuk jenis kegiatan yang masuk ke dalam pemanfaatan sumber radiasi pengion kelompok A tertentu. Pemanfaatan iradiator masuk ke dalam kelompok A tertentu, sehingga untuk kegiatan yang masuk kedalam kelompok A tertentu maka izin diterbitkan secara bertahap, meliputi:

1. izin konstruksi;
2. izin operasi; dan/atau
3. penutupan.

Berdasarkan PP No. 29 Tahun 2008 iradiator terdiri dari kategori I, II, III, dan IV baik yang menggunakan pembangkit radiasi pengion atau zat radioaktif terbungkus. Hubungan antara izin yang diterbitkan secara bertahap dengan jenis iradiator adalah sebagai berikut:

1. Izin konstruksi dan izin operasi berlaku untuk iradiator kategori II dan III dengan zat radioaktif terbungkus, dan iradiator kategori II dengan pembangkit radiasi pengion.
2. Izin konstruksi, izin operasi, dan izin penutupan hanya berlaku untuk iradiator kategori IV dengan zat radioaktif terbungkus.

Sedangkan untuk iradiator kategori I baik dengan zat radioaktif terbungkus maupun pembangkit radiasi pengion bukan merupakan bagian kelompok A tertentu, sehingga tidak memerlukan izin bertahap.

#### **b. Identifikasi Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 11/Ka-BAPETEN/VI-99**

Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 11/Ka-BAPETEN/VI-99 merupakan peraturan pelaksana dari PP Nomor 12 Tahun 1975 tentang Izin Pemakaian Zat Radioaktif dan atau Sumber Radiasi Lainnya. Dimana saat ini PP mengenai perizinan yang berlaku adalah PP Nomor 29 Tahun 2008. Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 11/Ka-BAPETEN/VI-99 merupakan perangkat peraturan yang saat ini masih berlaku terkait dengan pengawasan iradiator. Iradiator didefinisikan sebagai perangkat peralatan pemancar radiasi dengan sumber radionuklida pemancar gamma atau pesawat akselerator pembangkit sinar-X dan/atau berkas elektron, yang digunakan untuk tujuan penelitian, sterilisasi/ pasteurisasi, polimerisasi maupun untuk pengawetan bahan makanan [4]. Di dalam peraturan tersebut tidak dijelaskan konsep kategorisasi dan jenis dari iradiator.

Dalam Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 11/Ka-BAPETEN/VI-99, izin pemanfaatan terdiri atas:

1. izin konstruksi; dan  
setiap pemohon izin konstruksi harus mengajukan uraian teknis tentang konstruksi iradiator berdasarkan keterangan pabrik pembuat dan laporan analisis keselamatan instalasi iradiator. Detail dari persyaratan ini masuk kedalam lampiran yang merupakan bagian tidak terpisahkan dari Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 11/Ka-BAPETEN/VI-99.
2. izin operasi, diberikan secara bertahap yaitu:
  - a) izin operasi sementara, memiliki masa berlaku 1 bulan.
  - b) izin operasi jangka panjang, memiliki masa berlaku 5 tahun.

Pada waktu konstruksi menjelang akhir pengerjaan maka pemegang izin konstruksi harus mengajukan izin operasi dengan memenuhi persyaratan:

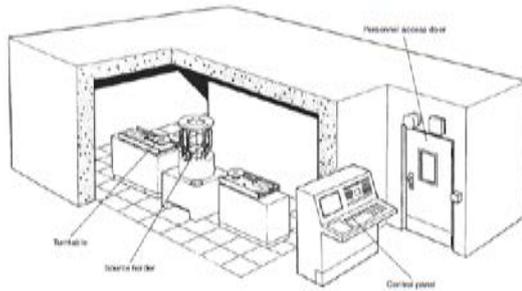
1. instalasi iradiator telah memenuhi persyaratan bangunan;
2. iradiator harus dilengkapi dengan peralatan listrik, mekanik, dan air;
3. mempunyai tenaga yang telah mendapatkan izin kerja dari BAPETEN dengan kualifikasi tertentu; dan
4. instalasi iradiator harus tersedia peralatan pengamanan.

#### **c. Identifikasi rekomendasi IAEA**

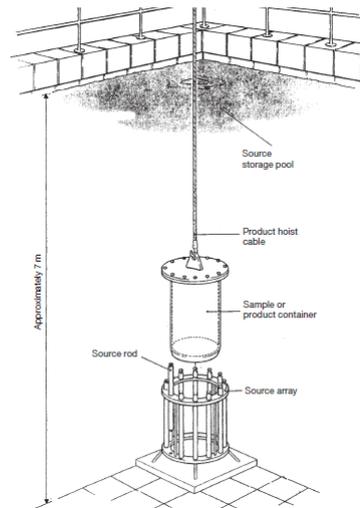
IAEA telah menerbitkan rekomendasi dalam dokumen *Specific Safety Guide 8 on Radiation Safety of Gamma, Electron and X Ray Irradiation Facilities (SSG 8)* yang menggantikan dokumen *IAEA Safety Series 107 on Radiation Safety of Gamma and Electron Irradiation Facilities*. Ruang lingkup yang diatur dalam SSG-8 adalah untuk iradiator kategori II, III, dan IV baik yang menggunakan zat radioaktif terbungkus maupun pembangkit radiasi pengion. Lingkup dalam SSG-8 tidak lagi mencakup rekomendasi teknis untuk iradiator dengan zat radioaktif terbungkus kategori I dan iradiator dengan pembangkit radiasi pengion kategori I.

Iradiator kategori I dapat digunakan dalam skala yang lebih kecil untuk sterilisasi seperti obat-obatan, makanan untuk pasien yang mendapat perawatan medis yang menekan sistem kekebalan tubuh, penelitian *steam cell*, iradiasi produk biologi, sterilisasi serangga, dll. Pasien tersebut juga dapat diberikan transfusi darah dengan komponen yang diiradiasi untuk mencegah penolakan (*Graft Versus Host Disease/ GVHD*) [5].

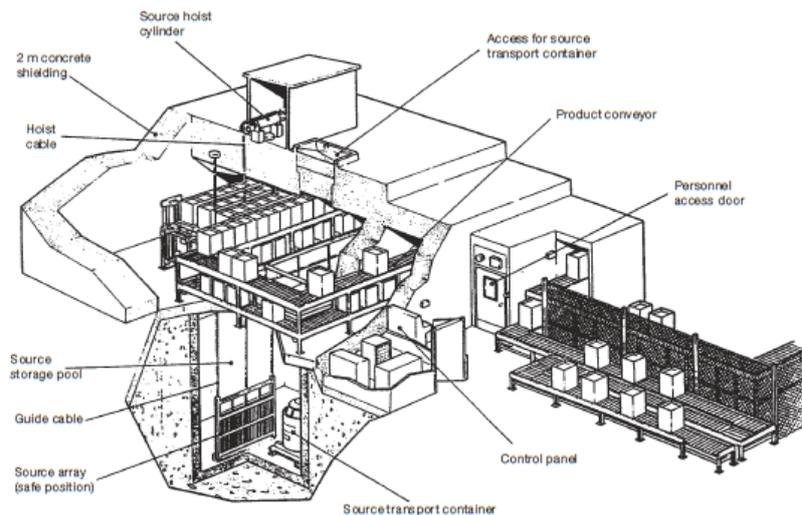
Gambar 1, 2, dan 3 di bawah ini merupakan contoh gambar dari jenis iradiator dengan zat radioaktif terbungkus kategori II, III, dan IV.



Gambar 1. Irradiator dengan zat radioaktif kategori II [6]



Gambar 2. Irradiator dengan zat radioaktif kategori III [6]



Gambar 3. Irradiator dengan zat radioaktif kategori IV [6]

Rekomendasi terkait dengan keselamatan radiasi terhadap irradiator dalam SSG-8 dibahas dalam beberapa bab yang berisikan diantaranya terkait dengan:

1. tanggung jawab organisasi yang mengoperasikan irradiator (pemegang izin) dan personil terkait dengan irradiator;
2. pemantauan dosis perorangan;
3. pemantauan daerah kerja;
4. perlengkapan proteksi radiasi;
5. desain irradiator beserta fitur keselamatannya;
6. pengujian dan perawatan terhadap parameter keselamatan;
7. pengangkutan, *loading* dan *unloading* sumber radioaktif; dan
8. rencana penanggulangan keadaan darurat.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan pokok bahasan yang sudah dijelaskan di atas, terdapat beberapa pertimbangan yang digunakan untuk mengidentifikasi persyaratan-persyaratan sebagai muatan dalam pengembangan Peraturan BAPETEN mengenai keselamatan radiasi dalam penggunaan irradiator, diantaranya adalah:

**a. Ruang Lingkup Pengaturan**

Nomenklatur judul dalam Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 11/Ka-BAPETEN/VI-99 terbatas dalam izin konstruksi dan operasi iradiator. Jika melihat kembali ketentuan pengaturan pengamanatan perizinan pemanfaatan iradiator dalam PP No. 29 Tahun 2008, pemanfaatan iradiator masuk ke dalam kelompok A tertentu. Kegiatan yang masuk kedalam kelompok A tertentu maka izin diterbitkan secara bertahap, meliputi izin konstruksi, izin operasi dan/atau penutupan. Dengan telah dikelompokkannya iradiator kedalam beberapa jenis dan kategori, maka judul yang diusulkan dan dipertimbangkan juga harus mampu melingkupi semua jenis dan kategori iradiator. Judul yang dapat dipertimbangkan adalah Peraturan BAPETEN mengenai keselamatan radiasi dalam penggunaan iradiator.

Dalam penyusunan peraturan perundangan perlu dibatasi sejauh mana peraturan tersebut akan mengatur. Dengan melihat pola penyusunan peraturan terhadap beberapa produk peraturan BAPETEN yang telah terbit terkait dengan jenis pemanfaatan tenaga nuklir, maka ruang lingkup pengembangan peraturan ini akan mengatur tentang persyaratan izin, persyaratan keselamatan radiasi, intervensi, rekaman dan laporan dalam penggunaan iradiator. Lingkup iradiator yang akan diatur meliputi:

1. Iradiator dengan zat radioaktif terbungkus dikategorikan menjadi:
  - a) Iradiator dengan Zat Radioaktif Terbungkus Kategori I;
  - b) Iradiator dengan Zat Radioaktif Terbungkus Kategori II;
  - c) Iradiator dengan Zat Radioaktif Terbungkus Kategori III; dan
  - d) Iradiator dengan Zat Radioaktif Terbungkus Kategori IV.
2. Iradiator dengan pembangkit radiasi pengion dikategorikan menjadi:
  - a) Iradiator dengan Pembangkit Radiasi Pengion Kategori I; dan
  - b) Iradiator dengan Pembangkit Radiasi Pengion Kategori II.

**b. Persyaratan Izin dan Persyaratan Keselamatan Radiasi**

Tabel 1. Sistematika Kerangka Pengembangan Peraturan BAPETEN mengenai Keselamatan Radiasi dalam Penggunaan Iradiator

Kerangka	Identifikasi Pengaturan
BAB I Ketentuan Umum	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Berisikan definisi-definisi yang digunakan dalam penyusunan peraturan.</li> <li>2. Mengatur tentang persyaratan izin, persyaratan keselamatan radiasi, intervensi, rekaman, dan laporan.</li> </ol>
BAB II Persyaratan Izin	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Berisikan persyaratan dokumen administrasi dan dokumen teknis untuk masing-masing jenis iradiator.</li> <li>2. Persyaratan dan mekanisme perpanjangan izin.</li> </ol>
BAB III Persyaratan Keselamatan Radiasi	
Persyaratan Manajemen	Menjelaskan tugas dan tanggung jawab dari pemegang izin dan personil yang terkait.
Persyaratan Proteksi Radiasi	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Justifikasi</li> <li>2. Limitasi Dosis</li> <li>3. Optimisasi proteksi dan keselamatan radiasi</li> </ol>
Persyaratan Teknik	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Menjelaskan persyaratan teknik untuk masing-masing jenis iradiator diantaranya penjelasan tentang bangunan iradiator, akses ke sumber radiasi, ruang kendali, ruang iradiasi, ventilasi, dan sistem pemadam kebakaran.</li> <li>2. Menjelaskan persyaratan untuk iradiator kategori II, III, dan IV dengan zat radioaktif terbungkus harus mempertimbangkan perisai radiasi, modul dan rak zat radioaktif, sistem indikator posisi rak zat radioaktif, tempat keluar kontainer, dan sistem kolam.</li> </ol>
Verifikasi keselamatan	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Pengujian terhadap parameter keselamatan yang dilakukan secara periodik.</li> <li>2. Pengujian dilakukan secara periodik meliputi uji mingguan, bulanan, dan enam bulanan.</li> </ol>

BAB IV Intervensi	Menjelaskan tentang intervensi terhadap paparan darurat yang dapat timbul akibat penggunaan iradiator.
BAB V Rekaman dan Laporan	Menjelaskan kewajiban pemegang izin untuk membuat rekaman dan laporan.
BAB VI Ketentuan Penutup	

Pada kerangka BAB II sebagaimana tercantum dalam tabel 1 mengenai persyaratan izin akan dijelaskan mengenai mekanisme mendapatkan izin pemanfaatan iradiator dan mekanisme perpanjangan izin. Untuk memperoleh izin, pemohon harus mengajukan permohonan secara tertulis kepada Kepala BAPETEN, dengan mengisi formulir dan menyampaikan dokumen persyaratan izin. Dokumen persyaratan izin disesuaikan dengan jenis dan kategori dari iradiator yang serta mekanisme persyaratan izin untuk masing-masing iradiator. Dengan telah terbitnya Peraturan Pemerintah No. 24 Tahun 2018 tentang Pelayanan Perizinan Berusaha Terintegrasi Secara Elektronik, maka mekanisme persyaratan izin dalam pemanfaatan iradiator juga harus menyesuaikan dengan ketentuan yang diatur dalam PP Nomor 24 Tahun 2018 tersebut.

BAB III mengenai persyaratan keselamatan radiasi dijelaskan mengenai persyaratan manajemen, proteksi dan keselamatan radiasi, teknik, dan verifikasi keselamatan. Detail terkait dengan persyaratan manajemen menjelaskan tugas dan tanggung jawab yang terlibat dalam pemanfaatan iradiator seperti pemegang izin, petugas proteksi radiasi, petugas dosimeter, petugas perawatan, dan operator. Persyaratan manajemen ini disesuaikan dengan jenis dan kategori iradiator yang digunakan. Hal ini juga harus disesuaikan dengan nomenklatur yang ada dalam Peraturan Kepala BAPETEN No. 16 Tahun 2014 tentang Surat Izin Bekerja Petugas Tertentu yang Bekerja di Instalasi yang Memanfaatkan Sumber Radiasi Pengion. Sebagai pembanding terhadap tugas dan tanggung jawab personil perlu melihat rekomendasi persyaratan personil yang dibahas dalam SSG-8.

Persyaratan proteksi radiasi menjelaskan secara umum mengenai prinsip proteksi dan keselamatan radiasi yaitu justifikasi, limitasi dosis, dan optimisasi. Justifikasi pemanfaatan iradiator harus didasarkan pada asas manfaat lebih besar daripada risiko yang ditimbulkan. Penerapan limitasi dosis dilakukan untuk memastikan bahwa nilai batas dosis untuk pekerja dan anggota masyarakat tidak terlampaui. Sedangkan penerapan optimisasi bertujuan agar besarnya dosis yang diterima serendah mungkin yang dapat dicapai dengan mempertimbangkan faktor sosial dan ekonomi.

Di dalam persyaratan teknik diuraikan secara detail mengenai teknis dari masing-masing jenis dan kategori iradiator. Dengan melihat ketentuan dalam rekomendasi SSG-8, secara garis besar persyaratan teknik tersebut meliputi:

1. bangunan iradiator;
2. akses ke ruang iradiasi;
3. ruang kendali;
4. ruang iradiasi;
5. perisai radiasi;
6. modul dan rak zat radioaktif;
7. sistem ventilasi;
8. sistem pemadam kebakaran;
9. sistem penggerak rak zat radioaktif;
10. sistem kondisioning air; dan/atau
11. sistem kolam.

Untuk memastikan fitur keselamatan dalam pemanfaatan iradiator berjalan sesuai dengan kriteria keberterimaannya, maka perlu dilakukan pemeriksaan dan pemantauan terhadap parameter-parameter tersebut. Verifikasi keselamatan dilakukan dengan pengujian terhadap parameter keselamatan yang dilakukan secara berkala dalam kurun waktu tertentu (mingguan, bulanan, dan 6 bulanan). Pemeriksaan parameter keselamatan ini diantaranya adalah pemeriksaan :

1. indikator status sistem keselamatan;
2. sistem *interlock*;
3. sistem penggerak rak zat radioaktif;
4. sistem kondisioning air;
5. sistem ketinggian air dan pelindung sumber;

6. peralatan penghenti darurat berupa kabel tarik (*pull cable*) dan tombol penghenti darurat;
7. pengatur waktu tunda;
8. monitor radiasi terpasang tetap;
9. detektor ozon dan detektor api/asap; dan/atau
10. lampu tanda radiasi, tanda peringatan, dan alarm peringatan;

Dari beberapa pertimbangan dalam mengidentifikasi persyaratan pengaturan dalam pengembangan peraturan BAPPETEN mengenai keselamatan radiasi dalam penggunaan iradiator tersebut di atas, tentunya perlu didiskusikan lebih lanjut dengan seluruh *stakeholder* terkait, baik internal maupun eksternal BAPETEN untuk mendapatkan pola pengaturan yang tepat dan mampu terap. Persoalan yang mungkin muncul dalam penerapan peraturan baru harus mampu teridentifikasi ketika melakukan koordinasi baik secara internal atau eksternal BAPETEN.

## KESIMPULAN

Identifikasi pengembangan peraturan Kepala BAPETEN mengenai keselamatan radiasi dalam penggunaan iradiator harus harmonis dengan ketentuan pengaturan dan rekomendasi internasional. Iradiator dibagi menjadi 4 kategori yaitu iradiator kategori I, kategori II, kategori III, dan kategori IV, baik yang menggunakan zat radioaktif terbungkus maupun pembangkit radiasi pengion. Berdasarkan ketentuan PP No. 29 Tahun 2008 dan PP No. 33 Tahun 2007, setiap orang atau badan yang akan memanfaatkan tenaga nuklir wajib memiliki izin pemanfaatan tenaga nuklir dan memenuhi persyaratan keselamatan radiasi. Identifikasi persyaratan pengaturan yang diperlukan sebagai bahan untuk melakukan pengembangan Peraturan BAPETEN mengenai keselamatan radiasi dalam penggunaan iradiator harus dilakukan dengan pertimbangan terhadap ruang lingkup pengaturan, persyaratan administrasi, dan persyaratan teknis dalam penggunaan iradiator. Ruang lingkup pengembangan peraturan ini akan mengatur tentang persyaratan izin, persyaratan keselamatan radiasi, intervensi, rekaman dan laporan dalam penggunaan iradiator. Persyaratan izin mengatur tentang mekanisme untuk mendapatkan izin pemanfaatan iradiator dan mekanisme perpanjangan izin. Sedangkan persyaratan keselamatan radiasi mengatur tentang persyaratan manajemen, persyaratan proteksi dan keselamatan radiasi, persyaratan teknik, dan verifikasi keselamatan. Persyaratan manajemen menjelaskan tugas dan tanggung jawab yang terlibat dalam pemanfaatan iradiator seperti pemegang izin, petugas proteksi radiasi, petugas dosimeter, petugas perawatan, dan operator. Penerapan proteksi dan keselamatan radiasi sesuai dengan prinsip justifikasi, limitasi dosis, dan optimisasi proteksi dan keselamatan radiasi. Persyaratan teknik menjelaskan tentang fasilitas dari masing-masing iradiator. Persyaratan teknik diantaranya adalah bangunan iradiator, akses ke ruang iradiasi, ruang kendali, ruang iradiasi, perisai radiasi, modul dan rak zat radioaktif, sistem ventilasi, sistem pemadam kebakaran, sistem penggerak rak zat radioaktif, sistem kondisioning air, dan sistem kolam. Verifikasi keselamatan dilakukan untuk memastikan bahwa fitur keselamatan berjalan sesuai dengan kriteria keberterimaan melalui pengujian parameter keselamatan yang dilakukan secara berkala.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Republik Indonesia, "Undang-undang Nomor 10 Tahun 1997 tentang Ketenaganukliran". Republik Indonesia (1997).
- [2] Republik Indonesia, "Peraturan Pemerintah Nomor 29 Tahun 2008 Tentang Perizinan Pemanfaatan Sumber Radiasi Pengion Dan Bahan Nuklir". Republik Indonesia (2008)
- [3] Republik Indonesia, "Peraturan Pemerintah Nomor 33 Tahun 2007 tentang Keselamatan Radiasi Pengion dan Keamanan Sumber Radioaktif". Republik Indonesia (2007).
- [4] Republik Indonesia, "Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 11/Ka-BAPETEN/VI-99 Tentang Izin Konstruksi Dan Operasi Iradiator". Republik Indonesia (1999).
- [5] IAEA, "Manual on Self Contained Gamma Irradiators (Categories I and III)". IAEA, Vienna (1986).
- [6] IAEA SSG-8, "Specific Safety Guide 8 (SSG-8) Radiation Safety of Gamma , Electron and X Ray Irradiation Facilities". IAEA, Vienna (2010)

## **KAJIAN TENTANG *DESIGN EXTENSION CONDITION* DAN *DEFENCE IN DEPTH* TERKAIT PERATURAN KESELAMATAN DESAIN PLTN**

**Diah Hidayanti Sukarno**

*Badan Pengawas Tenaga Nuklir, Jl. Gajah Mada 8 Jakarta Pusat 10120  
email: d.hidayanti@bapeten.go.id*

### **ABSTRAK**

**KAJIAN TENTANG *DESIGN EXTENSION CONDITION* DAN *DEFENCE IN DEPTH* TERKAIT PERATURAN KESELAMATAN DESAIN PLTN.** Kecelakaan Fukushima telah memberikan pelajaran yang sangat penting bagi upaya peningkatan keselamatan PLTN, khususnya pada aspek keselamatan desain. IAEA menindaklanjuti pembelajaran kecelakaan Fukushima dengan merumuskan konsep *design extension condition* (DEC) dan memperbaharui konsep *defense in depth* (DiD). Tingkat implementasi kedua konsep tersebut masih berbeda-beda di setiap negara. Kajian tentang konsep DEC dan konsep DiD yang baru perlu dilakukan agar diperoleh pemahaman dan interpretasi yang baik sehingga implementasinya ke dalam kerangka regulasi dapat berjalan dengan benar. Makalah ini mengkaji konsep DEC dan konsep DiD yang baru melalui dua tahap metode, yaitu studi literatur serta kompilasi dan analisis data yang diperoleh dari literatur. Tujuan kajian adalah untuk memahami konsep dasar DEC dan konsep DiD yang diperbaharui sehingga dapat dipahami pula implementasinya pada aspek keselamatan desain. Hasil kajian yang penting adalah bahwa DEC yang dulunya dikenal sebagai BDBA saat ini harus dipertimbangkan dalam desain dasar PLTN. DEC berimplikasi pada penambahan fitur-fitur keselamatan. Dengan adanya konsep DEC, peran penyungkup dan *core catcher* menjadi semakin dipertimbangkan dalam proses desain PLTN. Konsep DEC juga berimplikasi pada pembaharuan konsep DiD, yaitu dengan menambahkan level pertahanan khusus untuk DEC, baik DEC tanpa kerusakan teras yang signifikan maupun DEC dengan pelelehan teras. Konsep DEC dan DiD yang baru perlu dipertimbangkan untuk dinyatakan secara lebih eksplisit di dalam regulasi BAPETEN.

Kata kunci: *design extension condition*, *defense in depth*, keselamatan desain, PLTN, regulasi.

### **ABSTRACT**

**THE ASSESSMENT OF DESIGN EXTENSION CONDITION AND DEFENCE IN DEPTH RELATED TO THE DESIGN SAFETY REGULATION OF NPP.** Fukushima accident has given the important lessons in enhancing the safety of NPP, specifically the design safety aspect. IAEA has considered the lesson learned from Fukushima accident by proposing the concept of *design extension condition* (DEC) and revising the concept of *defense in depth* (DiD). The implementation stages of both concepts in each country are different. The study of DEC concept and new DiD concept is needed to be performed in order to gain good understanding and interpretation, so that the implementation of both concepts into regulations framework could be executed in the right way. This paper assessed the DEC concept and the new DiD concept through two steps, i.e. literature study and compilation as well as analysis of literature data. The purpose of assessment is to understand the basic concept of DEC and the revised concept of DiD in order to find out how to implement both concepts in the safety design aspect. The important result was that DEC, which was similar to BDBA in the past, shall be taken into account in the basic design of NPP. The implication of DEC is provision of safety features which is design for DEC specifically. In DEC concept, the role of containment and core catcher is more considered in design process of NPP. The other implication of DEC is the revision of DiD concept by adding a specific protection level for DEC, including DEC without significant fuel damage and DEC with core melting. The DEC concept and the new DiD concept are needed to be considered explicitly in the BAPETEN regulation.

Keywords: design extension condition, defense in depth, safety of design, NPP, regulation.

## PENDAHULUAN

Kecelakaan nuklir membawa dampak katastropik bagi manusia dan lingkungan dalam jangka waktu yang panjang. Oleh karena itu, dari setiap kecelakaan nuklir harus dapat diambil pelajaran yang berharga dalam rangka mencegah terulangnya kejadian tersebut. Namun yang lebih penting dari mencegah terulangnya kecelakaan nuklir adalah upaya untuk meningkatkan keselamatan reaktor nuklir, khususnya PLTN, berdasarkan *lesson learned* dari kecelakaan nuklir tersebut.

Berdasarkan data dari World Nuclear Association [1], kapasitas tenaga nuklir di dunia mengalami peningkatan secara *steady*. Saat ini, terdapat 56 unit PLTN sedang dalam tahap konstruksi dan 152 unit sedang direncanakan [1]. Minat penggunaan energi nuklir nampaknya tidak mengalami penurunan yang signifikan pasca terjadinya kecelakaan nuklir di Fukushima Jepang. Banyak negara yang sedang membangun PLTN maupun sedang mempersiapkan infrastruktur untuk program PLTN perdananya. Dengan semakin banyaknya rencana pembangunan PLTN di masa depan, perubahan-perubahan penting dalam regulasi atau persyaratan keselamatan pasca terjadinya kecelakaan Fukushima mutlak diperlukan untuk meningkatkan aspek keselamatan pengoperasian PLTN. Salah satunya adalah perubahan dan perbaikan dalam aspek keselamatan desain.

Berdasarkan pembelajaran dari kecelakaan Fukushima, ada beberapa perubahan penting terkait dengan persyaratan keselamatan, di antaranya yaitu munculnya konsep *Design Extension Condition* (DEC) dan perubahan konsep *Defence in Depth* (DiD). Kedua perubahan konseptual tersebut membawa implikasi yang cukup signifikan bagi ketentuan keselamatan PLTN, termasuk pada aspek keselamatan desain.

Saat ini, belum semua negara secara eksplisit mengimplementasikan konsep DEC dan konsep DiD yang baru. Tahapan implementasi konsep DEC dan DiD yang baru ke dalam ketentuan peraturan yang lebih spesifik berbeda-beda di setiap negara. Negara-negara di Uni Eropa umumnya telah mengadopsi dengan cepat konsep DEC dan konsep DiD yang baru [2]. Berbeda halnya dengan USA, US NRC belum menerapkan secara formal konsep DEC dan masih menggunakan kerangka pengawasan yang berbasis manajemen risiko [3]. Namun demikian, kerangka pengawasan yang berbasis manajemen risiko tersebut secara implisit dapat memenuhi ketentuan DEC [2]. Sebagai hal yang baru, konsep DEC dan perubahan konsep DiD penting untuk dikaji agar dapat dipahami secara benar dan komprehensif. Pemahaman yang baik dan benar terhadap konsep DEC dan DiD yang baru sangat diperlukan untuk menjaga agar makna inti keselamatan dari kedua konsep tersebut terimplementasikan dalam regulasi dan ketentuan keselamatan dengan baik dan benar pula.

Makalah ini akan mengkaji tentang konsep DEC dan konsep DiD yang baru dalam kaitannya dengan aspek keselamatan desain PLTN. Dari kajian ini diharapkan akan tercapai interpretasi yang baik mengenai konsep dasar DEC dan DiD yang baru pada aspek keselamatan desain. Hal ini penting baik bagi negara-negara yang sudah stabil dalam pemanfaatan energi nuklir untuk kelistrikan, maupun bagi negara-negara yang masih dalam tahap perencanaan pembangunan PLTN. Bagi Indonesia, kajian ini dapat memberikan kontribusi bagi penyiapan infrastruktur program PLTN, termasuk diantaranya infrastruktur peraturan pengawasan ketenaganukliran.

## METODOLOGI KAJIAN

Kajian ini dilakukan melalui dua tahap, yaitu:

- Tahap studi literatur. Sumber-sumber referensi yang digunakan adalah dokumen-dokumen IAEA, baik standar keselamatan maupun dokumen teknis, contoh implementasi konsep DEC dan DiD di negara lain, serta makalah-makalah lain yang relevan.
- Tahap analisis data. Data-data yang diperoleh dari hasil studi literatur dikompilasi dan dianalisis sehingga dapat memberikan informasi dan kajian yang lebih lengkap mengenai konsep DEC dan konsep DiD yang baru pasca kecelakaan Fukushima.

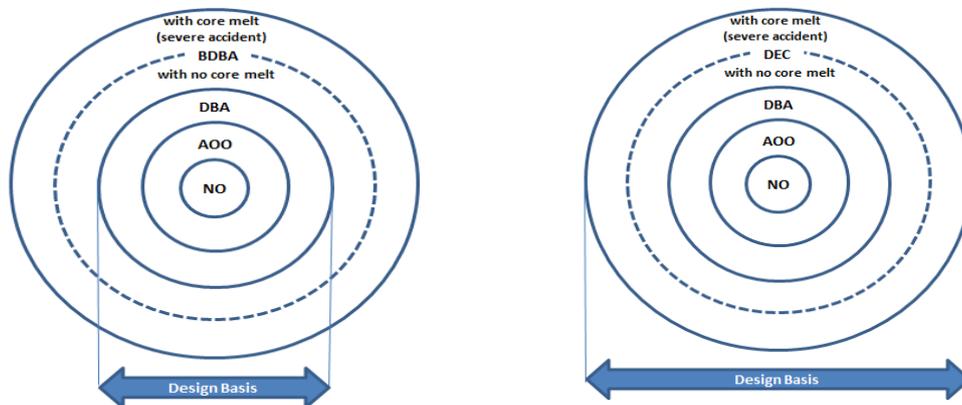
## HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah terjadinya kecelakaan PLTN Fukushima Daiichi di tahun 2011, tantangan utama yang muncul adalah bagaimana upaya untuk meningkatkan aspek keselamatan PLTN agar dapat mengatasi skenario bahaya di luar kemampuan desainnya yang menyebabkan terjadinya kecelakaan parah (*severe accident*), yaitu kecelakaan yang menyebabkan kerusakan teras reaktor secara signifikan (*core melting*). IAEA menjawab tantangan ini dengan mengeluarkan dokumen *IAEA Safety Standards Series No. SSR-2/1* dengan mengenalkan konsep DEC. Pada tahun 2016, dilakukan revisi terhadap dokumen

tersebut yang diterbitkan dalam bentuk *IAEA Safety Standards Series* No. SSR-2/1 (Rev.1) [4]. Pada revisi tersebut, terdapat perubahan yang merupakan pengembangan konsep DiD.

Design Extension Condition (DEC)

Kecelakaan Fukushima disebabkan oleh kejadian *multiple failure* yang dipicu oleh peristiwa *station blackout* (SBO). Kecelakaan tersebut telah melampaui kemampuan dasar desain reaktor sehingga menyebabkan terjadinya pelelehan teras. Hingga saat itu, skenario-skenario kecelakaan yang dampaknya melampaui kemampuan desain dasar dikenal dengan istilah *Beyond Design Basis Accident* (BDBA). Berdasarkan *IAEA Safety Standards Series* No. NS-R-1 [5], BDBA mencakup BDBA tanpa degradasi teras yang signifikan dan kecelakaan parah (*severe accident*). Sejalan dengan upaya untuk meningkatkan keselamatan PLTN pasca Fukushima, IAEA memperkenalkan konsep DEC menggantikan konsep BDBA. Sama halnya dengan BDBA, DEC juga terdiri dari kecelakaan yang dampaknya lebih parah dari DBA dan kecelakaan parah, yaitu kecelakaan yang menimbulkan kerusakan teras secara signifikan (*core melting*). Perbedaan yang signifikan antara DEC dan BDBA adalah jika BDBA tidak diperhitungkan dalam desain dasar reaktor, sedangkan DEC harus diperhitungkan dalam desain dasar reaktor. Perbedaan DEC dan BDBA tersebut digambarkan dengan jelas pada Gambar 1.



Gambar 1. Perbedaan konsep BDBA dan DEC terkait aspek desain reaktor

Konsekuensi dari konsep DEC adalah bahwa skenario-skenario kecelakaan BDBA pada reaktor-reaktor yang sudah ada, harus dipertimbangkan dalam proses desain reaktor yang baru. Pada *IAEA Safety Standards Series* No. SSR-2/1 (Rev.1), DEC dijadikan sebagai salah satu ketentuan persyaratan (*requirement*) dalam manajemen keselamatan desain PLTN, tepatnya *requirement* ke-20. Tujuan utama adanya ketentuan DEC adalah meningkatkan keselamatan dengan cara meningkatkan kapabilitas instalasi untuk dapat menghadapi kondisi kecelakaan yang lebih parah dari DBA tanpa menyebabkan lepasan zat radioaktif yang melebihi kriteria penerimaan yang sudah ditetapkan.

Dengan adanya konsep DEC, tentu membawa implikasi langsung pada perubahan kondisi instalasi (*plant state*) sebagaimana dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Perubahan kondisi instalasi pasca kecelakaan Fukushima

	Kondisi Operasional		Kondisi Kecelakaan	
<b>Sebelum kejadian Fukushima</b>	<i>Normal Operation</i> (NO)	<i>Anticipated Operational Occurrence</i> (AOO)	DBA	BDBA
<b>Setelah kejadian Fukushima</b>	<i>Normal Operation</i> (NO)	<i>Anticipated Operational Occurrence</i> (AOO)	DBA	DEC
			DEC-A: tanpa kerusakan bahan bakar yang signifikan	DEC-B: dengan pelelehan teras (kecelakaan parah)

DEC terdiri dari dua kondisi, yaitu:

- DEC-A: kondisi DEC tanpa kerusakan bahan bakar yang signifikan
- DEC-B: kondisi DEC dengan kerusakan teras yang parah (*core melting*). DEC-B biasa disebut sebagai kecelakaan parah (*severe accident*).

Adanya konsep DEC memberikan implikasi penting bagi desain, yaitu dengan penambahan fitur-fitur keselamatan khusus untuk DEC. Sebagai contoh, penambahan fitur-fitur tertentu dalam sistem pendinginan penyungkup darurat. Fitur-fitur keselamatan untuk DEC memiliki dua fungsi utama, yaitu:

- mencegah terjadinya pelelehan teras pada kondisi DEC tanpa kerusakan bahan bakar yang signifikan, dan
- memitigasi dampak pelelehan teras jika pelelehan teras tidak dapat dihindarkan lagi.

Sebelum adanya konsep DEC, kecelakaan yang mengakibatkan terjadinya pelelehan teras (*severe accident*) diantisipasi melalui manajemen kecelakaan. Setelah adanya konsep DEC, kecelakaan parah juga harus diantisipasi dalam tahap desain melalui penambahan fitur-fitur keselamatan tertentu.

Tujuan desain fitur keselamatan DEC-A adalah agar ketiga fungsi dasar keselamatan, yaitu pengendalian reaktivitas, pemindahan panas dari teras reaktor maupun kolam penyimpanan bahan bakar bekas, dan pengungkungan zat radioaktif, dapat berjalan dengan baik di instalasi. Adapun tujuan utama fitur keselamatan DEC-B adalah mengungkung zat radioaktif agar tidak lepas ke lingkungan secara tidak terkendali dengan cara mempertahankan integritas penyungkup. Fitur keselamatan untuk DEC-B harus didesain sedemikian rupa sehingga dapat mencegah fenomena-fenomena seperti ledakan hidrogen, pelelehan teras yang menembus beton dasar bejana tekan, dan ledakan uap.

Setelah kecelakaan Fukushima, peran penyungkup menjadi semakin diperhitungkan dan harus dipertimbangkan dalam desain untuk mengantisipasi kecelakaan DEC, terutama untuk memitigasi dampak kecelakaan parah. Dengan terjaganya integritas dan fungsi penyungkup, sekalipun teras mengalami kerusakan yang signifikan, lepasan zat radioaktif ke lingkungan tetap terkontrol dan berada dalam batasan yang masih bisa diterima berdasarkan kriteria penerimaan. Jadi, adanya ketentuan DEC menuntut agar penyungkup dapat berfungsi dengan baik untuk mengendalikan lepasan zat radioaktif ke lingkungan saat terjadinya pelelehan teras reaktor. Terkait dengan fungsi penyungkup, jika terdapat beberapa unit PLTN di suatu tapak, kondisi dari unit PLTN lain harus dipertimbangkan dalam analisis integritas penyungkup. Sebagaimana yang terjadi pada kecelakaan Fukushima, kerusakan penyungkup akibat ledakan hidrogen di suatu unit PLTN telah menjadi bahaya eksternal bagi unit instalasi lain di dekatnya. Penyungkup yang dimaksud disini, tidak hanya penyungkup bagi teras reaktor, namun juga termasuk penyungkup bagi kolam penyimpanan bahan bakar bekas. Selain penyungkup, peran *core catcher* juga semakin penting dalam desain PLTN baru untuk keperluan mitigasi pada kondisi kecelakaan parah.

Selain penambahan fitur-fitur keselamatan untuk DEC, dapat pula dilakukan peningkatan kapabilitas sistem keselamatan dalam rangka mencegah terjadinya kecelakaan parah atau untuk memitigasi dampaknya.

Sebagai bentuk pembelajaran kejadian Fukushima, kerusakan bahan bakar yang dipertimbangkan dalam DEC tidak hanya pada bahan bakar yang berada di teras reaktor, namun juga pada bahan bakar bekas yang berada di kolam penyimpanan.

Kecelakaan yang termasuk dalam kategori DEC-A adalah *complex failures* atau *multiple failures* dan kecelakaan yang melampaui kapabilitas sistem keselamatan untuk DBA. Berdasarkan referensi [6], contoh jenis kecelakaan yang umumnya termasuk dalam kategori DEC-A, antara lain *station blackout* (SBO), *anticipated transient without scram* (ATWS), kehilangan pemindahan panas sisa di teras reaktor, kehilangan pemindahan panas pada tempat penyimpanan bahan bakar bekas, kehilangan akses normal terhadap sumber pembuangan panas akhir, kehilangan total air umpan (*feed water*), *large of coolant accident* (LOCA) yang diikuti dengan tidak berfungsinya sistem pendingin teras darurat, dan MSGTR (*multiple steam generator tube ruptures*) untuk PWR. Adapun skenario kecelakaan yang termasuk dalam kategori DEC-B adalah semua skenario kecelakaan yang berakibat pada terjadinya kerusakan teras yang signifikan. Analisis penentuan skenario kecelakaan dalam kategori DEC, selain menggunakan analisis deterministik, juga perlu menggunakan analisis probabilistik atau metode *best estimate* serta *engineering judgement*. *Engineering judgement* dilakukan dengan berbasis pada pengalaman operasi, pembelajaran dari kecelakaan yang pernah terjadi, serta hasil-hasil penelitian yang terkait.

Kriteria penerimaan untuk DEC-A, antara lain berupa:

- tetap terjaganya integritas penyungkup
- kerusakan terbatas pada bahan bakar
- tidak ada kerusakan pada sistem pendingin reaktor
- tidak ada lepasan zat radioaktif ke lingkungan atau lepasan zat radioaktif ke lingkungan dalam jumlah yang minimum.

Adapun kriteria penerimaan untuk DEC-B, antara lain yaitu:

- terjaganya integritas penyungkup
- lepasan zat radioaktif ke lingkungan dalam jumlah dan waktu yang terbatas, serta
- tindakan kedaruratan dalam lingkup wilayah dan waktu yang terbatas.

Kondisi akhir yang diharapkan pada DEC-A adalah "*safe state*". *Safe state* adalah kondisi dimana reaktor bersifat subkritis dan fungsi dasar keselamatan dijamin dapat terlaksana dan dapat dijaga stabil dalam jangka waktu yang panjang [4]. Adapun kondisi akhir yang diharapkan pada DEC-B adalah "*controlled state*", yaitu kondisi dimana fungsi dasar keselamatan dapat dijamin dan dijaga dalam kurun waktu tertentu untuk mencapai kondisi *safe state* [4]. *Controlled state* dapat dikarakterisasi, misalnya dalam bentuk terlaksananya pemindahan panas sisa, stabilisasi bahan bakar yang rusak, pencegahan terjadinya re-kritikalitas, serta fungsi penyungkup yang terjaga untuk membatasi jumlah radionuklida yang lepas ke lingkungan.

Pada dasarnya, Perka BAPETEN No. 3 Tahun 2011 [7] secara implisit telah mengakomodir DEC, yaitu dengan memperhitungkan BDBA dan kecelakaan parah. Dari definisi pada pasal 1 tersirat bahwa kecelakaan parah adalah bagian dari BDBA yang mengakibatkan pelelehan teras, dimana kecelakaan parah tersebut identik dengan DEC-B. Pasal 1 tersebut juga menyiratkan bahwa ada bagian dari BDBA yang dampaknya masih lebih rendah dari kecelakaan parah, yaitu kondisi DEC yang tidak disertai dengan pelelehan teras (DEC-A). Pasal 33 menyebutkan bahwa reaktor daya harus didesain untuk mampu mengatasi BDBA dan kecelakaan parah. Dengan demikian jelas disini bahwa BAPETEN telah mengakomodir konsep DEC meski tidak secara eksplisit.

#### Defence in Depth (DiD)

Munculnya DEC sebagai salah satu kondisi instalasi membawa implikasi terhadap perubahan konsep *defence in depth* (DiD). DiD adalah kombinasi sejumlah level proteksi yang berurutan dan independen untuk menghadapi kondisi AOO dan kondisi kecelakaan. Level proteksi tersebut meliputi semua kegiatan yang terkait keselamatan, baik desain, organisasi, maupun operasi. Menurut INSAG-10 tahun 1996 [8], DiD pada reaktor daya terdiri dari lima level sebagaimana ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Level Pertahanan Berlapis (DiD) [8]

Level DiD	Tujuan	Sarana ( <i>tools</i> )
Level 1	Mencegah terjadinya operasi abnormal dan kegagalan	- Desain konservatif - Kualitas operasi & konstruksi yang tinggi
Level 2	Mengendalikan operasi abnormal dan mendeteksi kegagalan	- Sistem proteksi & pembatasan kontrol - Fitur surveilan lain
Level 3	Mengendalikan DBA	Fitur keselamatan teknis dan prosedur kecelakaan
Level 4	Mengendalikan kondisi instalasi yang parah, termasuk mencegah & memitigasi dampak kecelakaan parah	Sarana pelengkap & manajemen kecelakaan
Level 5	Mitigasi dampak radiologi dari pelepasan signifikan bahan radioaktif	Tanggap darurat di luar tapak

Level DiD sangat terkait dengan kondisi instalasi sehingga level DiD untuk desain PLTN yang baru lebih diperinci untuk mengakomodir konsep DiD pada kondisi DEC. Ada dua model pelevelan DiD, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Model level DiD yang baru pasca kecelakaan Fukushima [6,9]

Level DiD Model I	Tujuan	Upaya Desain	Upaya Operasional	Kondisi akhir yang diharapkan	Level DiD Model II
Level 1	Mencegah terjadinya operasi abnormal dan kegagalan SSK yang penting untuk keselamatan	<ul style="list-style-type: none"> <li>- desain konservatif</li> <li>- kualitas konstruksi yang tinggi untuk sistem operasi normal, termasuk sistem pengendalian &amp; pemantauan</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- aturan operasional</li> <li>- prosedur operasi normal</li> </ul>	Normal Operation (NO)	Level 1
Level 2	Mengendalikan operasi abnormal & mendeteksi kegagalan SSK yang penting untuk keselamatan dalam rangka mencegah eskalasi AOO menjadi kecelakaan	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sistem proteksi &amp; limitasi</li> <li>- Fitur surveilan lain</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Prosedur operasi abnormal, atau</li> <li>- prosedur operasi kedaruratan</li> </ul>	Segera kembali ke NO	Level 2
Level 3	3 a Mengendalikan DBA	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fitur keselamatan teknis (sistem keselamatan)</li> <li>- <i>Inherent safety</i></li> </ul>	prosedur operasi kedaruratan	<i>safe state</i> (terpenuhinya kriteria penerimaan untuk DBA)	Level 3
	3 b Mengendalikan DEC untuk mencegah terjadinya pelelehan teras	Fitur keselamatan untuk DEC tanpa pelelehan teras	prosedur operasi kedaruratan	<i>safe state</i> (terpenuhinya kriteria penerimaan untuk DEC tanpa pelelehan teras)	4a
Level 4	Mengendalikan DEC untuk memitigasi dampak kecelakaan parah	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fitur keselamatan untuk DEC dengan pelelehan teras</li> <li>- Technical Support Center</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Prosedur operasi kedaruratan atau</li> <li>- Pedoman manajemen kecelakaan parah</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Controlled state</i> (terjaminnya pembuangan panas sisa, stabilisasi bahan bakar yang rusak, pembatasan dampak radiologi)</li> <li>- Kerusakan teras yang terbatas</li> <li>- Terjaganya integritas penyungkup</li> </ul>	4b Level 4
Level 5	Mitigasi dampak radiologi dari pelepasan signifikan bahan radioaktif	Fasilitas tanggap darurat di dalam & luar tapak	Rencana & prosedur kedaruratan di dalam dan luar tapak	-	Level 5

Kedua model level DiD tersebut memiliki kelebihan masing-masing. Pada model I, pemisahan antara upaya pencegahan dan upaya mitigasi dibatasi dengan jelas, sehingga level 3 fokus pada upaya pencegahan kecelakaan parah, sedangkan level 4 fokus pada upaya mitigasi dampak kecelakaan parah. Adapun pada model II, pembatasan antara level DiD untuk DBA dan level DiD untuk DEC ditandai secara jelas.

Salah satu bentuk implementasi DiD adalah dengan adanya serangkaian lapisan penghalang fisik. Jumlah penghalang fisik ditentukan oleh *source term* (jumlah dan komposisi isotopik), efektivitas setiap lapisan penghalang, serta potensi bahaya internal dan eksternal yang ada. Namun demikian, konsep DiD tidak hanya diinterpretasikan dengan sejumlah lapisan penghalang dan proteksi, tetapi juga sebagai prinsip-prinsip dasar yang digunakan untuk menyusun ketentuan-ketentuan keselamatan untuk menjamin kualitas dan kehandalan lapisan-lapisan penghalang dan proteksi tersebut.

Kriteria penerimaan untuk setiap level DiD dapat ditentukan berdasarkan pada beberapa faktor, antara lain kondisi integritas teras dan dampak radiologi. Secara skematis, kondisi integritas teras reaktor dan dampak radiologi untuk setiap level DiD digambarkan pada Gambar 2.

Level DiD	Level 1	Level 2	Level 3a	Level 3b	Level 4	Level 5
Kondisi instalasi terkait	NO	AOO	DBA	DEC-A	DEC-B	-
<b>Integritas Teras</b>	Tidak ada kerusakan pada teras		Kerusakan teras yang terbatas		Kerusakan teras yang parah	
<b>Dampak Radiologi</b>	Di bawah batas regulasi				Memerlukan tindakan kedaruratan yang terbatas dalam lingkup wilayah dan waktu	Melebihi batas regulasi

Gambar 2. Kriteria penerimaan untuk setiap level DiD [10]

Pada setiap level DiD dapat ditentukan kriteria penerimaan sebagaimana dicontohkan dalam Tabel 4.

Tabel 4. Contoh kriteria penerimaan untuk setiap level DiD [6]

Level DiD	Kriteria penerimaan untuk menjaga integritas penghalang fisik	Kriteria penerimaan untuk membatasi dampak radiologi
Level 1	Tidak terjadi kegagalan pada penghalang fisik	Dampak radiologi di sekitar instalasi dapat diabaikan. Nilai dosis efektif yang dapat diterima biasanya di sekitar rentang radiasi latar, yaitu 0,1 mSv/tahun (nilai batas ditentukan oleh badan pengawas)
Level 2	Tidak terjadi kegagalan pada penghalang fisik	Dampak radiologi di sekitar instalasi dapat diabaikan. Nilai dosis efektif yang dapat diterima biasanya di sekitar rentang radiasi latar, yaitu 0,1 mSv/tahun (nilai batas ditentukan oleh badan pengawas).
Level 3	3a - Tidak ada atau ada kerusakan terbatas pada bahan bakar - Tidak terjadi kegagalan pada sistem pendingin reaktor - Terjaganya integritas penyungkup	Tidak ada dampak radiologi di sekitar instalasi atau minor. Nilai dosis efektif yang dapat diterima biasanya dalam jumlah mSv/tahun yang rendah (nilai batas ditentukan oleh badan pengawas).
	3b - Kerusakan terbatas pada bahan bakar - Tidak terjadi kegagalan pada sistem pendingin reaktor - Terjaganya integritas penyungkup	Tidak ada dampak radiologi di sekitar instalasi atau minor. Nilai dosis efektif yang dapat diterima biasanya sama atau sedikit lebih tinggi dari level 3a (nilai batas ditentukan oleh badan pengawas).

Tabel 4. Lanjutan

Level DiD	Kriteria penerimaan untuk menjaga integritas penghalang fisik	Kriteria penerimaan untuk membatasi dampak radiologi
Level 4	Terjaganya integritas penyungkup	Dampak radiologi yang memerlukan tindakan kedaruratan yang terbatas dalam lingkup wilayah dan waktu.
Level 5	Tingkat kerusakan integritas penyungkup	Dampak radiologi di luar tapak yang memerlukan tindakan kedaruratan

Setelah pembahasan mengenai konsep DEC dan DiD, berikut ini akan dipaparkan secara ringkas contoh penerapan konsep DEC dan DiD yang baru dalam regulasi di salah satu negara Uni Eropa, yaitu Finlandia. Dalam Guide YVL B.1 [11] disebutkan bahwa terdapat lima level DiD (lihat Tabel 5).

Tabel 5. Pelevelan DiD dalam ketentuan desain keselamatan di Finlandia

Level DiD	Kategori	Tujuan	
Level 1	DBC 1	Mencegah deviasi dari operasi normal	
Level 2	DBC 2	Mengendalikan AOO dan mencegah berkembangnya AOO menjadi kecelakaan	
Level 3	3a	Mengendalikan kecelakaan terpostulasi kelas 1 dan kelas 2 untuk membatasi lepasan bahan radioaktif	
			DBC 3 DBC 4
	3b	Mengendalikan DEC	
			DEC 1
			DEC 2 DEC 3
Level 4	Kecelakaan parah	Mengungkung lepasan zat radioaktif pada kondisi kecelakaan parah	
Level 5	-	Mitigasi dampak radiologi	

*Design Basis Condition* (DBC) adalah istilah yang digunakan dalam regulasi ketenaganukliran di Finlandia untuk merepresentasikan semua kondisi instalasi yang diperhitungkan dalam desain reaktor. DBC mencakup baik kondisi operasi normal (NO), AOO, maupun DBA. DBC 1 adalah kondisi operasi normal, sedangkan DBC 2 adalah AOO yang frekuensi terjadinya minimal sekali dalam 100 tahun. DBC 3 dan DBC 4 adalah kecelakaan terpostulasi yang berasal dari kejadian tunggal dimana frekuensi terjadinya DBC 3 minimal sekali dalam  $10^2 - 10^3$  tahun sedangkan frekuensi terjadinya DBC 4 minimal sekali dalam  $10^3 - 10^5$  tahun. DEC 1 adalah DBC 2 atau DBC 3 yang melibatkan *common cause failure* pada sistem yang diperlukan untuk menjalankan fungsi keselamatan. DEC 2 adalah kecelakaan yang disebabkan oleh kombinasi kegagalan-kegagalan yang signifikan berdasarkan analisis risiko probabilistik. DEC 3 adalah kondisi kecelakaan yang disebabkan oleh kejadian eksternal yang sangat jarang terjadi tanpa mengakibatkan kegagalan bahan bakar yang parah. Pada prinsipnya, regulasi di Finlandia telah menerapkan konsep DEC dan konsep DiD yang baru. Hanya saja, terdapat perbedaan dalam penggunaan istilah sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Perbandingan level DiD

Level DiD		IAEA	Finlandia
Level 1		NO	DBC 1
Level 2		AOO	DBC 2
Level 3	3a	DBA	DBC 3
			DBC 4
	3b	DEC-A	DEC 1
			DEC 2
	DEC 3		
Level 4		DEC-B ( <i>Severe accident</i> )	<i>Severe accident</i>

Regulasi di Finlandia membagi DBA dalam dua kategori kecelakaan berdasarkan tingkat probabilitasnya (DBC 3 dan DBC 4) serta mengklasifikasikan DEC-A, yaitu DEC tanpa degradasi teras yang signifikan, dalam tiga kategori, yaitu DEC 1, DEC 2, dan DEC 3 berdasarkan penyebab kecelakaan dan frekuensi terjadinya.

### KESIMPULAN

Dari kajian ini dapat disimpulkan beberapa hal penting, antara lain bahwa DEC harus dipertimbangkan dalam desain dasar suatu PLTN untuk mengatasi kondisi kecelakaan yang lebih parah dari DBA dan kondisi kecelakaan parah tanpa menimbulkan lepasan radioaktif ke lingkungan yang melampaui kriteria penerimaan. DEC diimplementasikan ke dalam desain melalui penambahan fitur-fitur keselamatan khusus untuk DEC. Untuk mengakomodir konsep DEC, dilakukan penambahan dua level DiD, yaitu level DiD untuk mencegah berkembangnya kecelakaan menjadi kecelakaan parah dan level DiD untuk memitigasi dampak kecelakaan parah. Dengan adanya konsep DEC dan konsep DiD yang baru, peran penyungkup dan *core catcher* semakin penting untuk dipertimbangkan dalam proses desain PLTN. Konsep DEC dan pembaharuan konsep DiD perlu diimplementasikan secara lebih eksplisit dalam kerangka regulasi, termasuk halnya dalam regulasi BAPETEN.

### DAFTAR PUSTAKA

1. <http://www.world-nuclear.org>, World Nuclear Association, Agustus, London (2018).
2. Tung, N.D.C., "Investigation Of Design Extension Condition", Thesis, Dalat University, Da Lat (2016).
3. Chen S., Li Z., Mei Q., "Implementation Design Extension Conditions (Decs) Within The Scope Of Risk Management Regulatory Framework", IAEA-CN-251, IAEA, Juni, Vienna (2017).
4. IAEA SAFETY STANDARDS SERIES NO. SSR-2/1 (REV.1), "Safety of Nuclear Power Plants: Design", IAEA, Februari, Vienna (2016).
5. IAEA SAFETY STANDARDS SERIES NO. NS-R-1, "Safety of Nuclear Power Plants: Design", IAEA, September, Vienna (2000).
6. IAEA-TECDOC-1791, "Considerations on the Application of the IAEA Safety Requirements for the Design of Nuclear Power Plants", IAEA, Mei, Vienna (2016).
7. Perka BAPETEN, "Ketentuan Keselamatan Desain Reaktor Daya", Perka BAPETEN No. 3 Tahun 2011, BAPETEN, Jakarta (2011).
8. INSAG-10, "Defence in Depth in Nuclear Safety", INSAG, Juni, Vienna (1996).
9. Carnino A. and Gasparini M., "Defence-In-Depth and Development of Safety Requirements for Advanced Nuclear Reactors", The Proceedings of Workshop on Advanced Nuclear Reactor Safety Issues and Research Needs, Februari, Paris (2002).
10. Cimeša S. et al., "Transposition Challenges of New WENRA Requirements into Slovenian Regulation", Proceedings of the International Conference Nuclear Energy for New Europe, Slovenia, September (2015).
11. Regulatory Guides on nuclear safety (YVL), "Safety Design of a Nuclear Power Plant", YVL B.1, The Radiation and Nuclear Safety Authority (STUK), Helsinki, (2013).

Halaman ini sengaja di kosongkan

## KAJIAN FORMAT DAN ISI LAPORAN ANALISIS KESELAMATAN REAKTOR DAYA

Agus Waluyo<sup>1</sup>, Reno Alamsyah<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> BAPETEN, Jl. Gajah Mada No.8, Jakarta Pusat, 10040  
email: a.waluyo@bapeten.go.id

### ABSTRAK

#### KAJIAN FORMAT DAN ISI LAPORAN ANALISIS KESELAMATAN REAKTOR DAYA.

Telah dilakukan suatu kajian mengenai pedoman format dan isi yang seharusnya digunakan dalam penyusunan dokumen Laporan Analisis Keselamatan (LAK) untuk reaktor daya. LAK adalah salah satu persyaratan teknis yang paling penting dalam perizinan pembangunan dan pengoperasian instalasi nuklir, sebagaimana disyaratkan dalam Peraturan Pemerintah No. 2 Tahun 2014 tentang Perizinan Instalasi Nuklir dan Pemanfaatan Bahan Nuklir (PP 2/2014). Guna menjamin isi LAK mangkus dan sangkil dalam mengomunikasikan risiko, maka pada umumnya badan pengawas menerbitkan pedoman mengenai format dan isi LAK. BAPETEN telah menerbitkan dua pedoman penyusunan LAK, yaitu untuk instalasi nuklir nonreaktor pada tahun 2006 dan untuk reaktor nondaya pada tahun 2013. Namun, hingga saat ini BAPETEN belum menerbitkan pedoman untuk reaktor daya atau PLTN. Di sisi lain, IAEA telah menerbitkan DS 449 sebagai rancangan akhir pedoman format dan isi LAK PLTN. Dengan demikian, maka tujuan dari penulisan makalah ini adalah untuk mengkaji kemungkinan penggunaan DS 449 dalam menyusun pedoman pembuatan LAK reaktor daya. Metodologi yang digunakan dalam kajian ini bersifat deskriptif, analitik dan kualitatif. Studi pustaka dan kajian perbandingan dilakukan antara peraturan perundangan-undangan nasional dengan standar IAEA dan US-NRC. Kajian ini menghasilkan usulan ringkasan format dan isi LAK sebagaimana disajikan pada Lampiran I. Disimpulkan pula bahwa BAPETEN perlu menerbitkan pedoman format dan isi LAK untuk reaktor daya sebagaimana diamanatkan dalam PP 2/2014, dengan mengadopsi dokumen IAEA DS 449 dan dilengkapi kriteria keberterimaan yang, jika sesuai, diambil dari standar terbaik negara-negara yang telah ajeg dalam pengoperasian dan pengawasan PLTN.

Kata kunci: Format dan isi, Laporan Analisis Keselamatan (LAK), peraturan, pedoman.

### ABSTRACT

#### THE STUDY ON FORMAT AND CONTENT OF SAFETY ANALYSIS REPORT FOR NUCLEAR POWER PLANT.

A study on the guideline of format and content that should be used in developing a Safety Analysis Report (SAR) has been carried out. SAR is one of the most important technical requirements in the licensing of construction and operation of nuclear power plants, as it's been required by Government Regulation No. 2 Year 2014 on the Licensing of Nuclear Installations and the Utilization of Nuclear Materials (GR 2/2014). In order to assure that SAR can be effectively and efficiently communicating risks, generally nuclear regulatory body issues a guideline regarding the format and content of SAR. BAPETEN has issued two guidelines for the preparation of SAR of non-reactor nuclear installations in 2006 and for non-power reactors in 2013. However, BAPETEN has not issued the guideline for NPP. In other side, the IAEA has published DS 449 as the final draft of guideline on the format and content of SAR for NPPs. Hence, the purpose of study is to evaluate the possibility of using DS 449 in preparing guidelines for developing SAR of NPPs. The methodology used in this study is descriptive, analytic and qualitative in nature. Literature studies and comparative studies were conducted between national legislation and the IAEA and the US-NRC standards. As the result of this study, Appendix I presents an excerpt of guideline on the format and content of SAR for NPPs. It was concluded that BAPETEN needs to publish a guideline on the format and content of SAR for NPPs as it's been mandated in the GR 2/2014. BAPETEN may adapt the IAEA DS 449 document in the preparation of this guideline with acceptance criteria, where applicable, taken from the best national standards of countries that have been well established in the operation and regulation of NPPs.

Keywords: Fomat and content, Safety Analysis Report (SAR), regulation, guidelines.

## PENDAHULUAN

Laporan Analisis Keselamatan (LAK) adalah salah satu persyaratan teknis yang paling penting dalam perizinan pembangunan dan pengoperasian PLTN. LAK, sebagaimana dipersyaratkan dalam Peraturan Pemerintah No. 2 Tahun 2014 tentang Perizinan Instalasi Nuklir dan Pemanfaatan Bahan Nuklir (PP 2/2014) [1], pada dasarnya mengomunikasikan tingkat risiko fasilitas. Untuk perizinan reaktor daya komersial, PP ini bahkan mensyaratkan dua jenis LAK, yaitu: LAK (yang pada dasarnya berisi analisis deterministik) dan LAK Probabilistik.

Guna menjamin LAK mangkus dan sangkil dalam mengomunikasikan risiko, maka pada umumnya badan pengawas menerbitkan pedoman mengenai format dan isi LAK. Hingga saat ini, BAPETEN telah menerbitkan dua pedoman penyusunan LAK: Untuk instalasi nuklir nonreaktor pada tahun 2006 [2], dan untuk reaktor nondaya pada tahun 2012 [3]. Namun, BAPETEN belum menerbitkan pedoman serupa untuk reaktor daya.

Kedua pedoman yang telah diterbitkan tersebut mengadopsi antara lain standar IAEA GS-G-4.1 *Format and content of the safety analysis report for nuclear power plants: safety guide* [4] yang terbit tahun 2004. Sesuai dengan judulnya, GS-G-4.1 tentu saja dapat diadopsi oleh BAPETEN dalam menyusun pedoman LAK reaktor daya. Namun, saat ini konsep pengganti GS-G-4.1, yaitu DS 449 [5] sudah dalam tahap akhir dan segera akan diterbitkan pada penghujung tahun 2018 ini [6].

Dengan memerhatikan uraian di atas, maka tujuan dari penulisan makalah ini adalah untuk mengkaji kemungkinan penggunaan DS 449 dalam membuat pedoman penyusunan LAK reaktor daya guna melaksanakan amanah dari PP 2/2014. Tentu saja panduan seperti ini harus segera dibuat dengan mengingat bahwa pada beberapa tahun belakangan terdapat berbagai usulan pembangunan reaktor daya, baik yang bersifat eksperimental [7] maupun untuk keperluan komersial [8]. LAK yang akan dibahas pada makalah ini dibatasi untuk yang bersifat deterministik, dan bukan LAK Probabilistik.

## POKOK BAHASAN

Pokok-pokok yang menjadi bahasan kajian ini adalah mengenai telaah atas perkembangan standar IAEA, perbandingan standar IAEA dengan persyaratan PP2/2014 mengenai LAK, dan telaah singkat mengenai pedoman LAK di Amerika Serikat (AS) sebagai perbandingan secara umum. Akhirnya, disampaikan hasil kajian mengenai pedoman penyusunan LAK yang dapat diterbitkan oleh BAPETEN.

### Standar LAK IAEA

Kajian dimulai dengan menelaah standar IAEA GS-G-4.1 dan rancangan penggantinya DS 449. Asal-muasal standar dan dokumen yang terkait perlu dipetakan. Sehingga, hubungan antar dokumen menjadi jelas dan memudahkan dalam membuat pedoman penyusunan LAK maupun dalam menyusun LAK itu sendiri.

### Studi Perbandingan

Penjelasan PP 2/2014 menyatakan bahwa LAK antara lain berisi 19 bab, mulai dari pendahuluan, uraian tujuan keselamatan dan persyaratan desain, karakteristik tapak, reaktor nuklir, hingga kepada kesiapsiagaan dan penanggulangan kedaruratan nuklir. Selanjutnya, PP ini menyatakan bahwa ketentuan mengenai penyusunan dokumen LAK diatur dengan Peraturan Kepala BAPETEN (Perka). Kata 'antara lain' dalam PP di atas memberikan cukup keluwesan bagi BAPETEN dalam menyusun Perka pelaksanaannya, sedemikian sehingga BAPETEN dapat menambahkan bab lain yang dianggap penting dalam mengomunikasikan keselamatan secara menyeluruh. Keluwesan seperti itu dibutuhkan mengingat bahwa standar internasional pun berkembang sesuai dengan peningkatan ilmu pengetahuan tentang keselamatan. Kajian ini kemudian membandingkan antara persyaratan minimum LAK yang diatur dalam PP 2/2014 dengan kandungan DS 499. Dua hal penting yang dicermati dalam perbandingan ini adalah mengenai kandungan LAK dan jenis-jenisnya.

### Standar LAK US-NRC

Jika standar IAEA pada umumnya bersifat generik, maka aturan, standar atau pedoman dari negara pengoperasi PLTN pada umumnya bersifat spesifik, seperti yang dilakukan di AS. Dalam hal ini, US-NRC adalah badan pengawas AS yang dapat dikatakan mewakili kelompok negara penganut pendekatan preskriptif, yaitu dengan seperangkat peraturan yang sangat teknis dan rinci. Dengan demikian, mengulas kandungan pedoman

penyusunan LAK yang diterbitkan US-NRC juga menjadi penting, baik dalam mengupayakan agar kajian ini menjadi lebih maknawi maupun dalam membuatnya lebih menyeluruh.

## **METODOLOGI**

Metodologi yang digunakan dalam kajian ini bersifat deskriptif, analitik dan kualitatif. Studi pustaka dan kajian perbandingan dilakukan antara peraturan perundang-undangan nasional dengan standar IAEA dan US-NRC.

## **HASIL DAN PEMBAHASAN**

### **Standar LAK IAEA**

Pada tahun 1970 IAEA telah menerbitkan *Safety Series* No. 34 [9] mengenai pedoman untuk tata letak dan isi LAK untuk PLTN stasioner. Bab-bab utama dokumen ini menjelaskan persyaratan untuk tapak, komponen dan sistem, analisis keselamatan, dan aspek-aspek operasional. Dasar-dasar yang kokoh ini bertahan cukup lama, hingga pada 2004 IAEA dalam menerbitkan pedoman keselamatan GS-G-4.1 [4] bertajuk format dan isi LAK PLTN, yang kemudian akan digantikan dengan DS 449 [5] pada akhir 2018 ini. Mengingat tahapan-tahapan dalam pembuatan standar IAEA sebagaimana dituangkan dalam [6], maka kandungan DS 449 dapat dipastikan tidak akan berbeda dengan standar yang nantinya akan diterbitkan.

GS-G-4.1 dan DS 449 bukanlah dokumen yang dapat berdiri sendiri. Untuk memahami persyaratan yang terkandung di dalamnya dibutuhkan standar umum dan terutama pedoman teknis yang relevan, antara lain: GSR Part 4 [10] mengenai penilaian keselamatan fasilitas dan kegiatan, dan SSG-2 [11] tentang analisis keselamatan PLTN secara deterministik. Kedua dokumen ini menggantikan pedoman keselamatan NS-G-1.2 tentang penilaian dan verifikasi keselamatan PLTN. Dokumen teknis lain yang tak kalah penting adalah SSR-2/1 (Rev.1) [12] mengenai keselamatan desain PLTN dan SSR-2/2 (Rev.1) [13] tentang keselamatan komisioning dan operasi PLTN. Persyaratan tematik seperti proteksi radiasi, lingkungan, sistem manajemen, dekomisioning dan kesiapsiagaan nuklir juga mengikuti persyaratan dan pedoman masing-masing topik tersebut sebagaimana telah diterbitkan IAEA.

Pada Bab tentang cakupan, DS449 menerangkan bahwa standar ini dapat secara langsung diterapkan untuk reaktor berpendingin air, khususnya reaktor air ringan (LWR). Hal ini dapat dipahami karena LWR adalah tipe reaktor yang sangat umum digunakan di dunia. Meskipun demikian, dikatakan pula bahwa bagian-bagian tertentu lainnya dapat juga digunakan pada reaktor-reaktor tipe lainnya.

### **Studi Perbandingan**

Perbandingan antara bab-bab LAK yang diatur dalam PP 2/2014 dengan yang disajikan dalam DS 449 adalah sebagaimana ditampilkan pada Tabel 1 pada halaman berikut. Dari judul-judul Bab yang diuraikan pada Tabel ini, dapat dilihat bahwa semua yang disyaratkan PP 2/2014 terdapat juga dalam DS 449, sehingga DS 449 tentu lebih lengkap. Persyaratan Desain yang disyaratkan pada Bab II LAK menurut PP 2/2014 dibuat lebih spesifik pada Bab III dalam DS 449 dengan penambahan Persyaratan Desain dari Struktur, Sistem dan Komponen. Perluasan cakupan terjadi pada bab-bab LAK versi PP 2/2014 tentang Sistem Pendingin Reaktor Nuklir; Sistem Pendukung; Komisioning; dan, Dekomisioning, yang dalam LAK versi DS 449 menjadi Sistem Pendingin Reaktor dan Sistem yang Terkait; Sistem Pendukung dan Struktur Sipil; Konstruksi Instalasi dan Komisioning; serta, Dekomisioning dan Aspek Akhir Usia Instalasi.

Di sisi lain, Bab IV mengenai Gedung dan Struktur pada LAK versi PP 2/2014 dihilangkan dan dijadikan satu dalam DS 449 Bab III tentang Tujuan Keselamatan dan Persyaratan Desain dari Struktur, Sistem dan Komponen. Sehingga, ada tiga Bab lain dalam DS 449 yang belum tertuang dalam PP 2/2014, yaitu: Sistem Uap dan Konversi Daya; Pengelolaan Limbah Radioaktif; dan, Rakayasa Faktor Manusia.

Sebagaimana dijelaskan pada bagian Pendahuluan DS 449, perubahan paling nyata pada pedoman keselamatan ini adalah terkait dengan persyaratan keselamatan yang ditetapkan dalam SSR 2/1 (Rev.1), khususnya mengenai: Kondisi perluasan cakupan desain; penguatan kemandirian dan kemangkusan pertahanan berlapis dalam berbagai tingkatan; kekokohan instalasi terhadap hazard luar yang ekstrem; dan, dihapuskannya kemungkinan

keadaan instalasi yang dapat mengakibatkan pelepasan radioaktif awal atau pelepasan radioaktif secara besar-besaran, seperti yang terjadi pada kecelakaan nuklir Fukushima. Dengan demikian, mengadopsi DS 449 dalam pedoman penyusunan LAK di bawah PP 2/2014 juga dapat dikatakan telah mendokumentasikan pembelajaran dari kecelakaan nuklir Fukushima, serta sejalan dengan prinsip-prinsip yang tertuang dalam *Vienna Declaration on Nuclear Safety* (VDNS) [14].

Tabel 1. Perbandingan Format dan Isi LAK Reaktor Daya menurut Beberapa Dokumen

PP 2/2014	IAEA DS 449	US-NRC NUREG-0800
I. Pendahuluan	I. Pendahuluan dan	I. Pendahuluan dan
II. Tujuan Keselamatan dan Persyaratan Desain.	Pertimbangan Umum.	Antarmuka.
III. Karakteristik Tapak.	II. Karakteristik Tapak.	II. Karakteristik Tapak dan
IV. Gedung dan Struktur.	III. Tujuan Keselamatan dan Persyaratan Desain Struktur, Sistem dan Komponen.	Parameter Tapak.
V. Reaktor Nuklir.	IV. Reaktor.	III. Desain Struktur, Komponen, Peralatan dan Sistem.
VI. Sistem Pendingin Reaktor Nuklir.	V. Sistem Pendingin Reaktor dan Sistem yang Terkait.	IV. Reaktor.
VII. Fitur Keselamatan Teknis.	VI. Fitur Keselamatan Teknis.	V. Sistem Pendingin Reaktor dan Sistem Terkait.
VIII. Instrumentasi dan Kendali.	VII. Instrumentasi dan Kendali.	VI. Fitur Keselamatan Teknis.
IX. Sistem Catu Daya Listrik.	VIII. Catu Daya listrik.	VII. Instrumentasi dan kendali.
X. Sistem Pendukung.	IX. Sistem Pendukung dan Struktur Sipil.	VIII. Catu Daya Listrik.
XI. Proteksi dan Keselamatan Radiasi.	X. Sistem Uap dan Konversi Daya.	IX. Sistem Pendukung.
XII. Pelaksanaan Operasi.	XI. Pengelolaan Limbah Radioaktif.	X. Sistem Uap dan Konversi Daya.
XIII. Rencana Pengelolaan dan Pamantauan Lingkungan.	XII. Proteksi Radiasi.	XI. Pengelolaan Limbah Radioaktif.
XIV. Komisioning.	XIII. Pelaksanaan Operasi.	XII. Proteksi Radiasi.
XV. Analisis Keselamatan.	XIV. Konstruksi Instalasi dan Komisioning.	XIII. Pelaksanaan Operasi.
XVI. Batasan dan Kondisi Operasi.	XV. Analisis Keselamatan.	XIV. Program Pengujian Awal.
XVII. Sistem Manajemen.	XVI. Batasan dan Kondisi Operasi.	XV. Analisis Transien dan Kecelakaan.
XVIII. Dekomisioning.	XVII. Sistem Manajemen.	XVI. Spesifikasi Teknis.
XIX. Kesiapsiagaan dan Penanggulangan Kedarutan Nuklir.	XVIII. Rakayasa Faktor Manusia.	XVII. Jaminan Mutu.
	XIX. Kesiapsiagaan dan Penanggulangan Kedarutan Nuklir.	XVIII. Reakayasa Faktor Manusia
	XX. Aspek Lingkungan.	XIX. Kecelakaan Parah.
	XXI. Dekomisioning dan Aspek Akhir Usia Instalasi.	

Selanjutnya, PP 2/2014 mensyaratkan Pemohon untuk mengajukan LAK pada saat pembangunan instalasi dalam proses pengajuan persetujuan desain, pengajuan izin konstruksi, dan persetujuan perubahan desain pada saat konstruksi; dan pada fase pengoperasian instalasi dalam proses pengajuan izin komisioning, persetujuan modifikasi dalam tahap izin komisioning, izin operasi, dan dalam persetujuan utilisasi atau modifikasi pada tahap operasi. Untuk setiap jenis LAK tersebut, PP 2/2012 pada dasarnya mensyaratkan adanya pembaruan informasi dan verifikasi atas LAK sebelumnya, sedemikian sehingga LAK terbaru tersebut relevan dengan persoalan keselamatan yang sedang dihadapi. Meskipun demikian, nama semua dokumen tetap sama, yaitu LAK.

DS 449 menyajikan penamaan LAK yang sedikit berbeda-beda untuk setiap tahap perizinan dengan mengutip praktik di berbagai negara. Contohnya, *Initial Safety Analysis Report* (ISAR) adalah LAK awal yang menjadi dasar perizinan tapak. *Preliminary Safety Analysis Report* (PSAR) adalah LAK di tahap berikutnya untuk otorisasi atau persetujuan desain dan izin konstruksi. Kemudian, ada *Pre-Operational Safety Analysis Report* (POSAR) yang menjadi dasar dalam izin komisioning dan operasi. Kemudian, selama masa pengoperasian PLTN, POSAR harus dimatangkan dengan berbagai informasi tambahan yang relevan, sehingga dapat diterbitkan *Operational Safety Analysis Report* (OSAR) atau *Final Safety Analysis Report* (FSAR).

### Standar LAK US-NRC

Pada Februari 1972, US-NRC untuk pertama kalinya menerbitkan standar format dan isi LAK PLTN [15]. Melalui beberapa kali perbaikan, US-NRC kemudian memublikasikan *Regulatory Guide 1.70 Rev.3* [16] dengan judul yang sama di bulan November 1978. Walaupun kedua dokumen sama-sama berisi 17 Bab, namun dokumen terakhir itu menjadi

semakin rinci dalam perkembangannya. Kedua dokumen ini ditujukan untuk reaktor tipe LWR.

US-NRC akhirnya menerbitkan *Standard Review Plan for the Review of Safety Analysis Reports for Nuclear Power Plants: LWR Edition* (NUREG-0800) [17], yang sangat terkenal dengan 19 Bab yang isinya terus berkembang secara dinamis dari tahun 1975 hingga saat ini. Untuk izin gabungan atas desain yang bersertifikat, US-NRC juga menerbitkan *Regulatory Guide 1.206* [18] dengan Bagian Pertama berisi standar format dan isi permohonan izin gabungan, yang juga berisi 19 bab dengan berbagai perbedaan penekanan. Untuk keperluan praktis perbandingan, daftar isi Bab NUREG-0800 disajikan pada Tabel 1 di atas. Dari kandungannya, maka berbagai hal yang spesifik untuk LWR dapat ditarik untuk mengisi persyaratan umum yang diberikan oleh DS 449.

### **Pedoman LAK BAPETEN**

Sebagai hasil dari kajian di atas dapat disampaikan beberapa hal sebagai berikut. Pertama, Pedoman LAK yang nantinya diterbitkan BAPETEN hendaknya berpedoman pada DS 449, terutama untuk mendemonstrasikan bahwa Indonesia telah memetik pembelajaran dari kecelakaan nuklir Fukushima dan sekaligus memenuhi prinsip-prinsip dari VDNS. Kedua, Pedoman LAK tersebut hendaknya memiliki cakupan yang bersifat umum, meskipun dapat langsung digunakan untuk reaktor berpendingin air, khususnya LWR. Ketiga, supaya lebih jelas, pedoman LAK yang akan diterbitkan BAPETEN hendaknya dilengkapi dengan kriteria keberterimaan. Dalam hal ini, BAPETEN dapat mengambil berbagai persyaratan teknis yang termuat dalam NUREG-0800, atau jika sesuai dengan *Regulatory Guide 1.206*. Keempat, ringkasan Bab LAK yang disarankan sebagai hasil kajian ini adalah sebagaimana termuat pada Lampiran I.

### **KESIMPULAN,**

Dari kajian ini dapat disimpulkan bahwa BAPETEN perlu menerbitkan pedoman format dan isi LAK untuk reaktor daya, sebagaimana diamanatkan dalam PP 2/2014. Pedoman tersebut sangat berguna dalam menjamin komunikasi yang mangkus dan sangkil antara Pemohon Izin dan BAPETEN mengenai tingkat risiko instalasi. BAPETEN dapat mengadopsi dokumen IAEA DS 449 dalam penyusunan pedoman tersebut dengan kriteria keberterimaan yang dapat diambil dari standar nasional terbaik negara-negara yang telah ajeg dalam pengoperasian dan pengawasn PLTN. Dengan mengadopsi DS 449, dapat dikatakan Indonesia telah memetik pembelajaran dari kecelakaan nuklir Fukushima dan sekaligus memenuhi prinsip-prinsip yang tertuang dalam VDNS.

### **UCAPAN TERIMA KASIH**

Para penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada manajemen P2STPIBN yang telah mendukung secara moral maupun administratif dalam penyusunan kajian ini. Para penulis juga mengucapkan terima kasih banyak kepada teman-teman sejawat di P2STPIBN yang telah membantu secara teknis dalam pelaksanaan kajian.

### **DAFTAR PUSTAKA**

1. Republik Indonesia, Peraturan Pemerintah No. 2 Tahun 2014 tentang Perizinan Instalasi Nuklir dan Pemanfaatan Bahan Nuklir, Setneg RI, Jakarta (2014).
2. BAPETEN, Peraturan Kepala BAPETEN No. 10 Tahun 2006 tentang Pedoman Penyusunan Laporan Analisis Keselamatan Instalasi Nuklir Nonreaktor, BAPETEN, Jakarta (2006).
3. BAPETEN, Peraturan Kepala BAPETEN No. 8 Tahun 2012 tentang Pedoman Penyusunan Laporan Analisis Keselamatan Reaktor Nondaya, BAPETEN, Jakarta (2012).
4. IAEA GS-G-4.1. "Format and content of the safety analysis report for nuclear power plants: safety guide", IAEA, Vienna (2004).
5. IAEA DS 449 Step 11.a. "Format and Content of the Safety Analysis Report for Nuclear Power Plants", IAEA, Vienna (2017).
6. IAEA DPP 449 Version 5. "Document Preparation Profile" of DS 449, IAEA, Vienna (2015).
7. BATAN, Peraturan Kepala BATAN No. 5 Tahun 2015 tentang Rencana Strategis 2015-2019, BATAN, Jakarta (2015).

8. WNA, "Nuclear Power in Indonesia. Updated April 2018", <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/indonesia.aspx>. Diakses tanggal 30 Juli 2018.
9. IAEA Safety Series No. 34. "Guidelines for the Layout and Contents of Safety Report for Stationary Nuclear Power Plants", IAEA, Vienna (1970).
10. IAEA GSR Part 4. "Safety Assessment for Facilities and Activities", IAEA, Vienna (2016).
11. IAEA SSG-2. "Deterministic Safety Analysis for Nuclear Power Plants", IAEA, Vienna (2009).
12. IAEA SSR-2/1 (Rev.1). "Safety of Nuclear Power Plants: Design", IAEA, Vienna (2016).
13. IAEA SSR-2/2 (Rev.1). "Safety of Nuclear Power Plants: Commissioning and Operation", IAEA, Vienna (2016).
14. IAEA, CNS/DC/2015/2/Rev.1 Vienna Declaration on Nuclear Safety, IAEA, Vienna (2015).
15. US-NRC, "Standard Format and Content of Safety Analysis Reports for Nuclear Power Plants", US-NRC, Washington DC. (1972).
16. US-NRC RG 1.70 Rev.3. "Standard Format and Content of Safety Analysis Reports for Nuclear Power Plants: LWR Edition", US-NRC, Washington DC. (1978).
17. US-NRC NUREG-0800. "Standard Review Plan for the Review of Safety Analysis Reports for Nuclear Power Plants: LWR Edition", US-NRC, Washington DC. (1975-2017).
18. US-NRC RG 1.206. "Combined License Applications for Nuclear Power Plants (LWR Edition), US-NRC, Washington DC. (2007).

## Lampiran-1 Hasil Kajian: Ringkasan Format dan Isi LAK RD

### I. Pendahuluan

Bab ini terdiri atas bagian umum, implementasi dari proyek, identifikasi agen dan kontraktor, informasi mengenai tata letak dan aspek lainnya, uraian umum instalasi, perbandingan dengan instalasi lain, gambar dan informasi detail instalasi, mode operasi normal instalasi, prinsip sistem manajemen, bahan acuan, peraturan serta kode dan standar yang dipakai.

### II. Karakteristik Tapak

Dalam bab 2 ini hendaknya memberikan informasi tentang karakteristik geologi, seismologi, gunung api, hidrologi, meteorologi, geoteknik tapak dan wilayah sekitar tapak dan karakteristik bahaya akibat ulah manusia dan lingkungan sekitar tapak, distribusi populasi saat ini dan proyeksi populasi dan tataguna lahan yang terkait dengan desain dan operasi instalasi.

### III. Tujuan Keselamatan Dan Persyaratan Desain

#### Untuk Struktur, Sistem Dan Komponen.

Bab 3 ini harus menguraikan konsep desain secara umum, persyaratan, *code* dan standar yang berlaku untuk berbagai jenis SSK dan pendekatan yang diadopsi untuk memenuhi tujuan keselamatan. Kesesuaian desain semua komponen harus dibuktikan secara rinci dalam bab-bab lain dari laporan analisis keselamatan, khususnya untuk deskripsi SSK yang berbeda.

### IV. Reaktor

Dalam bab ini terdiri atas uraian ringkas, perangkat bahan bakar nuklir, sistem kendali reaktivitas, struktur reaktor, reflektor dan moderator, sumber nuklir dan desain termohidrolik.

### V. Sistem Pendingin Reaktor Dan Sistem Terkait

Bab 5 LAK ini memuat uraian/informasi yang berhubungan sistem pendingin reaktor beserta sistem atau komponen lain yang terkait dengan sistem pendingin tersebut (sebagai contoh, sistem pengambil panas peluruhan, sistem pemantauan kualitas air dan termasuk sistem penyangga pemipaan sistem pendingin). Informasi yang dimaksud juga harus dapat menunjukkan kesesuaian antara rancangan dan persyaratan desain yang telah ditetapkan (Perka Desain Reaktor Daya).

Hal terpenting yang harus disampaikan adalah bahwa rancangan harus memenuhi persyaratan tersebut di atas, bab ini juga harus memberikan bukti bahwa sistem pendingin reaktor dapat mempertahankan integritasnya baik dalam kondisi normal maupun dalam kondisi kecelakaan yang diasumsikan (*design basis accident* dan *design extension condition*). Bukti yang dimaksud adalah hasil analisis keselamatan terhadap beban yang akan timbul pada batas tekanan sistem pendingin reaktor pada kondisi operasi selama umur reaktor juga harus ditunjukkan disini.

### VI. Fitur Keselamatan Teknis

Bab 6 ini harus menyajikan informasi yang berhubungan dengan fitur keselamatan teknis dan sistem yang berhubungan dengannya. Fitur keselamatan teknis yang dimaksud di bab ini adalah SSK yang dibutuhkan untuk menjalankan fungsi keselamatan secara memadai jika terjadi kecelakaan dasar desain, *design extension condition* (DEC), termasuk kecelakaan pelelehan teras, dan untuk beberapa kejadian operasional yang diantisipasi.

Bab mengenai Fitur keselamatan teknis harus menjabarkan dan membahas setiap sistem yang dipertimbangkan sebagai bagian dari fitur keselamatan teknis. Pembahasan mengenai

desain fitur keselamatan teknis harus mengidentifikasi persyaratan fungsional, menunjukkan bagaimana persyaratan fungsional tersebut memenuhi persyaratan peraturan, dan menunjukkan bagaimana desain fitur keselamatan memenuhi persyaratan fungsional.

### VII. Sistem Instrumentasi Dan Kendali

Bab ini harus menyediakan informasi mengenai sistem instrumentasi dan kendali dan pemenuhan terhadap persyaratan yang berlaku. Pemohon izin harus memberikan daftar seluruh instrumentasi, kendali, dan sistem pendukung yang terkait keselamatan, termasuk alarm, komunikasi, dan instrumentasi penampil.

### VIII. Sistem Catu Daya Listrik

Dalam bab ini menjelaskan mengenai definisi, fitur desain dan klasifikasi sistem catu daya *off site*, sistem catu daya *on site*, sistem catu daya siaga (*standby*), sistem daya AC alternatif dan sistem daya DC.

### IX. Sistem pendukung dan struktur sipil

Dalam bab ini harus memberikan uraian mengenai sistem pendukung dan juga struktur bangunan dari PLTN. Untuk sistem pendukung minimal mencakup:

- Sistem penyimpanan dan penanganan bahan bakar
- Sistem perpindahan panas
- Sistem udara dan gas
- Sistem pemanas, ventilasi dan pendingin udara.
- Sistem proteksi kebakaran
- Sistem pendukung untuk generator diesel atau generator turbin gas
- Peralatan angkat
- Sistem komunikasi, sistem pencahayaan dan sistem sanitasi air.

Sedangkan untuk pekerjaan sipil dan struktur, hal-hal berikut ini juga harus dijelaskan dalam LAK:

- Pondasi dan struktur yang terkubur
- Bangunan reaktor/kontainmen
- Struktur lainnya yang relevan dengan keselamatan Nuklir.

### X. Sistem uap dan konversi daya

Informasi yang disediakan di bab ini adalah:

- Persyaratan kinerja untuk generator turbin dalam kondisi operasi.
- Deskripsi pemipaan saluran uap utama dan katup kendali terkait, kondensor utama, sistem evakuasi kondensor utama, sistem generator turbin, sistem penyegelan turbin, sistem *bypass* turbin, sistem sirkulasi air, sistem pembersih kondensor, sistem pengumpan dan kondensat, dan jika tersedia, sistem blowdown pembangkit uap; program kimia air, bersama dengan pembahasan terkait dengan material uap, sistem air pengumpan dan sistem kondensat;
- pertimbangan laju percepatan korosi dalam desain sistem.

### XI. Pengolahan limbah radioaktif

Pada bagian ini berisi mengenai:

- Suku sumber
- Sistem pengelolaan limbah cair
- Sistem pengelolaan limbah gas
- Sistem pengelolaan limbah padat
- Proses dan pemantauan radiologi dan sistem sampling limbah termasuk pemantauan di dalam dan di luar tapak.

### XII. Proteksi radiasi

Dalam bagian ini berisi informasi mengenai metode proteksi radiasi dan perkiraan paparan radiasi kerja personil untuk konstruksi, operasi,

baik itu operasi normal maupun kejadian operasional terantisipasi. Secara garis besar dalam bagian ini berisi mengenai fasilitas dan desain peralatan, perencanaan dan prosedur dan teknik yang digunakan oleh pemohon dalam memenuhi standar perlindungan terhadap radiasi.

### XIII. Pelaksanaan operasi

Dalam bab ini menjelaskan bagaimana organisasi melaksanakan tanggung jawabnya dalam pengoperasian PLTN secara selamat. Secara khusus, bab ini ditujukan untuk:

- Masalah operasional yang penting yang terkait dengan keselamatan.
- Pendekatan yang diambil oleh organisasi pengoperasi untuk mengidentifikasi masalah dengan mengimplementasikan program operasi.
- Persyaratan yang diambil oleh organisasi pengoperasi untuk membuat dan menjaga staf, kompetensi teknik yang terakait keahlian dan prosedur operasi yang diikuti pada level yang diinginkan dan memastikan perlindungan kesehatan dan keselamatan masyarakat.

### XIV. Konstruksi dan komisioning instalasi

Pada bab ini berisi mengenai informasi mengenai tahap tahap yang dilakukan organisasi pengoperasi pada saat konstruksi maupun komisioning.

### XV. Analisis keselamatan

Bab ini memberikan penjelasan mengenai analisis keselamatan yang dilakukan untuk menilai keselamatan fasilitas dalam merespon *postulated initiating event* (PIE) dan skenario kecelakaan atas dasar kriteria penerimaan yang telah tersusun. Analisis ini mencakup analisis keselamatan deterministik dari operasi normal, kejadian operasi terantisipasi (AOO), kecelakaan dasar desain (DBA) dan DEC, termasuk kajian keselamatan probabilistik.

### XVI. Batas dan Kondisi Operasi

Isi dari bab ini secara garis besar sama dengan format dan isi batas dan kondisi operasi untuk reaktor non daya. Batas dan kondisi operasi terdiri atas:

- Batas keselamatan;
- Pengesetan sistem keselamatan;
- Kondisi batas untuk operasi normal;
- Persyaratan surveilan;
- Persyaratan administrasi.

### XVII. Sistem Manajemen

Bagian ini berisi ringkasan sistem manajemen reaktor yang meliputi:

- Informasi terkait penetapan, penilaian, dan peningkatan berkesinambungan atas kepemimpinan dan manajemen yang efektif untuk keselamatan.
- Uraian sistem manajemen yang mencakup ruang lingkup, tujuan dan sasaran sistem manajemen dalam pembangunan reaktor (LAK untuk persetujuan desain dan izin konstruksi), dan aspek yang menjadi lingkup penerapan.
- Model atau peta proses, dan identifikasi berbagai proses manajemen yang bertujuan untuk memastikan tujuan keselamatan secara keseluruhan ditetapkan, dikendalikan, dipantau dan ditinjau dan memberikan prioritas tertinggi bagi keselamatan.
- Penerapan budaya keselamatan.
- Integrasi Sistem manajemen dengan unsur-unsur lainnya.

### XVIII. Rekayasa Faktor Manusia

Bagian ini berisi mengenai penjelasan bagaimana prinsip HFE digunakan untuk mendesain antar muka manusia dan mesin (*Human Machine Interface*) dan program pelatihan serta memberikan informasi

pertimbangan kemampuan dan keterbatasan manusia dalam desain reaktor untuk mendukung kinerja operator.

### XIX. Kesiapsiagaan dan Penanggulangan Kedaruratan Nuklir

Isi dari bab ini dapat mengacu pada Perka 8 Tahun 2012 tentang Format dan Isi LAK untuk reaktor non daya. Dalam Perka tersebut dijelaskan bahwa untuk bagian ini menguraikan secara singkat isi dari program kesiapsiagaan nuklir, meliputi:

- Pendahuluan, yang meliputi:
  - Hasil kajian potensi bahaya radiologi yang digunakan sebagai dasar penentuan program kesiapsiagaan nuklir; dan
  - Penetapan zona kedaruratan nuklir;
- Infrastruktur, yang meliputi:
  - Organisasi;
  - Koordinasi;
  - Fasilitas dan peralatan;
  - Prosedur penanggulangan; dan/atau
  - Pelatihan dan/atau gladi kedaruratan nuklir
- Fungsi penanggulangan, yang meliputi:
  - Identifikasi, dan pelaporan dan pengaktifan;
  - Tindakan mitigasi
  - Tindakan perlindungan segera;
  - Tindakan perlindungan untuk petugas penanggulangan, pekerja, dan masyarakat; dan/atau
  - Pemberian informasi dan instruksi pada masyarakat

### XX. Aspek Lingkungan

Bab ini berisi mengenai:

- Aspek umum dari AMDAL
- Karakteristik tapak yang penting untuk keselamatan lingkungan
- Fitur instalasi yang dapat meminimalkan dampak lingkungan
- Dampak lingkungan karena kecelakaan yang dipostulasikan termasuk juga lepasan radioaktif.
- Dampak lingkungan karena dekomisioning
- Program pengukuran dan pemantauan lingkungan.

### XXI. Dekomisioning

Pada Bab ini harus menjelaskan rencana dekomisioning reaktor daya. Berisi informasi tentang desain reaktor daya dan prosedur operasi untuk mempermudah proses dekomisioning. Dasar desain yang berkaitan dengan dekomisioning harus diuraikan. Aspek desain reaktor daya yang memudahkan dekomisioning harus diuraikan, seperti pemilihan bahan yang tidak mudah teraktivasi dan mudah untuk didekontaminasi, pembongkaran dan penanganan komponen yang teraktivasi dari jarak jauh (*remote*), dan fasilitas yang memadai untuk mengolah limbah radioaktif.

## KARAKTERISTIK ISI PEMBERITAAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA NUKLIR DI MEDIA MASSA PADA TAHUN 2017

Yustantiana, S.I.Kom<sup>1</sup>, Purnomo, A.Md<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN), Jalan Kuningan Barat, Mampang Prapatan, Jakarta 12710

<sup>2</sup>Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN), Jalan Kuningan Barat, Mampang Prapatan, Jakarta 12710

email: tantiana@batan.go.id

### ABSTRAK

**KARAKTERISTIK ISI PEMBERITAAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA NUKLIR DI MEDIA MASSA PADA TAHUN 2017.** Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) merupakan salah satu jenis pembangkit listrik yang ramah lingkungan. Di Indonesia, wacana pembangunan PLTN tidak terlepas dari pro dan kontra. Media massa memberikan karakteristik isi tersendiri dalam memberitakan PLTN. Metodologi dalam penelitian ini adalah dengan menggunakan analisis isi yang bertujuan untuk mengetahui karakteristik isi dari pemberitaan terkait PLTN di media massa selama tahun 2017. Penelitian ini memberikan kesimpulan karakteristik isi pemberitaan PLTN di media massa dilihat dari topik, narasumber dan instansi narasumber, bulan pemberitaan, media yang memberitakan, dan kecenderungan nilai berita bagi instansi Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN). Topik yang paling banyak diangkat dalam memberitakan PLTN adalah mengenai eksistensi atau keberadaan PLTN. Narasumber yang paling banyak dijadikan sumber berita dalam pemberitaan terkait PLTN adalah narasumber dalam kategori "Lain-Lain". Instansi narasumber yang paling banyak dijadikan sumber berita terkait PLTN adalah instansi dalam kategori "Lain-Lain". Bulan pemberitaan terkait PLTN sepanjang tahun 2017 paling banyak muncul di bulan Januari. Media yang paling banyak memberitakan terkait PLTN adalah media dalam kategori "Lain-Lain". Separuh kecenderungan nilai pemberitaan terkait PLTN bernilai positif.

Kata kunci: karakteristik isi, PLTN, media massa

### ABSTRACT

**CONTENT CHARACTERISTICS OF THE NEWS OF NUCLEAR POWER PLANT IN MASS MEDIA IN 2017.** Nuclear Power Plant (NPP) is one type of environmentally friendly power plant. In Indonesia, the discourse of NPP development is inseparable from the pros and cons. The mass media provides its own content characteristics in reporting NPP. The methodology in this research is using content analysis which aims to find out the characteristics of the content of the news related to nuclear power plant in the mass media during 2017. This research provides conclusions on the characteristics of the content of NPP in the mass media viewed from the topic, interviewees and his/her agency, the month of the news, the media, and the tendency of news values for the National Nuclear Energy Agency (BATAN). The topic most widely raised in reporting NPP is the existence of NPP. The most widely used interviewees in news related to NPP are interviewees in the "Others" category. Interviewees agencies that are the most used as news sources related to NPP are agencies in the "Others" category. The month of news related to NPP throughout 2017 appeared most often in January. The most widely reported media related to NPP are the media in the "Others" category. Half the tendency of news coverage related to nuclear power plants is positive.

Keyword: content characteristics, NPP, mass media

### PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara kepulauan dengan populasi penduduk mencapai 270.05.853 juta jiwa pada tahun 2018. Jumlah penduduk yang banyak tentunya berpengaruh pada jumlah konsumsi listrik nasional. Diperkirakan kebutuhan energi listrik mencapai 115 GW pada 2025 mendatang, sedangkan kapasitas listrik terpasang saat ini baru mencapai 59 GW.

Berbagai upaya telah dilakukan pemerintah dalam memenuhi kebutuhan listrik nasional dengan mengoptimalkan sumber energi yang ada, termasuk meningkatkan target

penggunaan energi baru dan terbarukan (EBT). Salah satu sumber listrik alternatif yang memungkinkan dapat dioptimalkan adalah Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN).

PLTN merupakan salah satu jenis pembangkit listrik yang ramah lingkungan. Disebut ramah lingkungan karena sedikit sekali jumlah gas buangan yang ditimbulkan oleh PLTN. Sebagai perbandingan, menurut Badan Tenaga Atom Internasional (*International Atomic Energy Agency/ IAEA*), pembangkit listrik berkapasitas 1.000 MWe yang memakai batu bara, tapi tanpa teknologi pengolahan limbah, akan menghasilkan sekitar 320 ribu ton abu yang mengandung logam berat seperti merkuri dan lainnya. Belum lagi materi *sulphur oxides* dan *nitrous oxide* yang dilepas ke udara.

Perencanaan secara serius soal pembangunan PLTN sendiri telah dilakukan sejak awal 1970an. Akan tetapi krisis moneter pada tahun 1997 yang diikuti krisis politik mengakibatkan keterpurukan di semua sektor termasuk sektor kelistrikan, yang berakibat juga pada rencana pembangunan PLTN yang dianggap tidak relevan lagi. Namun, pasca krisis moneter, permintaan terhadap listrik kembali meningkat bahkan cenderung tinggi. Wacana nuklir sebagai energi alternatif kembali mengemuka bersamaan dengan sumber energi baru dan terbarukan lainnya.

Namun, Kebijakan Energi Nasional (KEN) dalam Peraturan Pemerintah Nomor 79 Tahun 2014 menyatakan bahwa energi nuklir merupakan pilihan terakhir. Presiden Joko Widodo kemudian memerintahkan Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) untuk menyusun peta jalan (*roadmap*) PLTN.

Menurut panduan IAEA, terdapat 19 infrastruktur PLTN yang harus dipenuhi suatu negara jika ingin membangun PLTN. Ke 19 infrastruktur tersebut meliputi: posisi nasional, keselamatan nuklir, manajemen, pendanaan dan pembiayaan, kerangka legislatif, *seifgard*, kerangka peraturan, proteksi radiasi, jaringan listrik, sumber daya manusia, keterlibatan pemangku kepentingan, tapak dan fasilitas pendukung, proteksi lingkungan, perencanaan kedaruratan, keamanan, siklus bahan bakar, limbah radioaktif, keterlibatan industri, dan pengadaan.

Di Indonesia, wacana pembangunan PLTN tidak terlepas dari pro dan kontra. Tidak dapat dipungkiri, media massa turut menyumbang pengaruh besar terhadap opini yang beredar di masyarakat mengenai PLTN. Menurut data Dewan Pers, jumlah media massa di Indonesia adalah yang terbanyak di dunia, sekitar 47.000 terbagi media cetak, radio, televisi dan berbasis *online*. Dari jumlah itu, 2.000 adalah media cetak, 674 radio, 523 televisi termasuk lokal, dan lebihnya media dalam jaringan (*online*). Peran media massa sangat penting dalam membentuk opini di masyarakat, salah satunya PLTN. Polemik PLTN turut memberikan karakteristik isi tersendiri bagi pemberitaan di media massa.

Biro Hukum, Hubungan Masyarakat, dan Kerja Sama (BHHK) – BATAN merupakan salah satu unit kerja di BATAN, yang salah fungsinya adalah pelaksanaan urusan hubungan antarlembaga pemerintah, swasta, lembaga swadaya masyarakat, dan media. Dalam menjalankan fungsi ini, BHHK antara lain melaksanakan kegiatan monitoring pemberitaan di media massa, termasuk pemberitaan terkait PLTN. Hasil monitoring yang dilakukan kemudian dikirim ke Pimpinan Tinggi Utama, Para Pimpinan Tinggi Madya dan Para Pimpinan Pratama BATAN dalam bentuk *digital clipping* melalui email. Selain itu, guntingan berita diupload dalam bentuk web digital dengan alamat [www.batan.go.id/gunber](http://www.batan.go.id/gunber). Guntingan berita sangat bermanfaat bagi BATAN untuk mengetahui pemberitaan mengenai PLTN di media massa.

Untuk mengetahui bagaimana rangkuman pemberitaan terkait PLTN yang didasarkan pada metode ilmiah, diperlukan analisis isi dari pemberitaan tersebut. Analisis isi bertujuan untuk mengetahui karakteristik isi dari berbagai pemberitaan di media massa. Analisis isi sangat diperlukan sebagai bahan masukan bagi Para Pimpinan BATAN baik dalam mengeluarkan pernyataan ataupun menentukan kebijakan. Analisis isi ini belum dilakukan secara rutin di BHHK sehingga Para Pimpinan belum mendapat masukan secara utuh mengenai bagaimana pemberitaan PLTN di media massa. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik isi dari pemberitaan terkait PLTN di media massa pada tahun 2017.

## TEORI

### Rencana Pembangunan PLTN di Indonesia

Indonesia merupakan negara kepulauan dengan populasi penduduk mencapai 270.05.853 juta jiwa pada tahun 2018 [12]. Jumlah penduduk yang banyak tentu membutuhkan konsumsi listrik yang tidak sedikit pula. Diperkirakan kebutuhan energi listrik

mencapai 115 GW pada 2025 mendatang [1], sedangkan kapasitas listrik terpasang saat ini baru mencapai 59 GW [10]. Di sisi lain, jumlah cadangan energi fosil seperti minyak bumi dan batu bara sangat terbatas. Untuk batu bara misalnya, diperkirakan jumlah cadangannya di Indonesia sekitar 28 miliar ton dan akan habis dalam kurun waktu 71 tahun. Peningkatan kebutuhan listrik dari berbagai sektor mengalami peningkatan rata-rata yaitu sekitar 9% per tahun akan sulit apabila hanya mengandalkan pada sumber energi fosil. Tuntutan pemenuhan kebutuhan listrik dan kualitas lingkungan yang bersih juga menjadi persyaratan yang terus dipenuhi dalam pembangkitan listrik di masa depan [1].

PLTN merupakan salah satu jenis pembangkit listrik yang ramah lingkungan. Disebut ramah lingkungan karena sedikit sekali jumlah gas buangan yang ditimbulkan oleh PLTN. Sebagai perbandingan, menurut IAEA, pembangkit listrik berkapasitas 1.000 MWe yang memakai batu bara, tapi tanpa teknologi pengolahan limbah, akan menghasilkan sekitar 320 ribu ton abu yang mengandung logam berat seperti merkuri dan lainnya. Belum lagi materi *sulphur oxides* dan *nitrous oxide* yang dilepas ke udara [1].

Jumlah limbah radioaktif dari PLTN juga relatif sedikit. Sebagai contoh, satu unit PLTN dengan jenis PWR berdaya 1.000 MWe dengan masa operasi selama 40 tahun hanya akan membutuhkan tempat penyimpanan limbah radioaktif berukuran  $3 \times 4 \times 10 \text{ m}^3$  atau  $120 \text{ m}^3$  [1].

Perencanaan secara serius soal pembangunan PLTN sendiri telah dilakukan sejak awal 1970an dengan pembentukan Komisi Persiapan Pembangunan PLTN (KP2 – PLTN). Tugas komisi ini adalah melakukan kajian tentang hal-hal yang terkait dengan kemungkinan pembangunan PLTN di Indonesia. Hasil kerja komisi diantaranya adalah menetapkan sekitar 14 lokasi yang diusulkan kepada Pemerintah untuk dilakukan studi lebih lanjut sebagai calon tapak PLTN. Secara keseluruhan pemilihan lokasi PLTN akan ditinjau dari berbagai segi yaitu dari hasil penilaian kelistrikan, prasarana transportasi, tersedianya air, kegunaan, hidrologi, kependudukan, lingkungan dan lain-lain. Hasil studi adalah berupa rekomendasi terbaik untuk PLTN pada waktu itu yaitu Ujung Lemah Abang, Ujung Grenggengan dan Ujung Watu, yang ketiga lokasi tersebut berada di wilayah Kabupaten Jepara [1].

Akan tetapi krisis moneter pada tahun 1997 yang diikuti krisis politik mengakibatkan keterpurukan di semua sektor termasuk sektor kelistrikan. Akibatnya banyak industri yang berhenti beroperasi dan menurunnya konsumsi terhadap listrik. Akibat lainnya dari kejadian itu adalah pembangunan PLTN menjadi dianggap tidak relevan lagi [1].

Namun, pasca krisis moneter, permintaan terhadap listrik kembali meningkat bahkan cenderung tinggi. Wacana nuklir sebagai energi alternatif kembali mengemuka bersamaan dengan sumber energi baru dan terbarukan lainnya seperti energi matahari, angin, panas bumi, air, dan biodiesel. Karena itulah kemudian ditetapkan kebijakan baru di bidang energi, yaitu Perpres No.5 Tahun 2006 tentang Kebijakan Energi Nasional (KEN). Melalui Perpres ini, ditetapkan bahwa untuk memenuhi kebutuhan listrik hingga tahun 2025 dibutuhkan kontribusi sumber energi terbarukan, masing-masing biofuel dengan besar porsi di atas 5%, nuklir, surya, angin dan biomassa di atas 5%, dan batu bara yang dicairkan di atas 2% [1].

Kemudian melalui Undang-Undang No. 17 tahun 2007 tentang Rencana Pembangunan Jangka Panjang Nasional (RPJPN) 2005 – 2025, disebutkan bahwa pemanfaatan PLTN sudah harus dimulai tahun 2015-2019 dengan mempertimbangkan faktor keselamatan secara ketat [8]. Namun di tahun yang sama terjadi penolakan besar-besaran oleh warga Jepara yang menolak wilayahnya dibangun PLTN. Kemudian pada tahun 2011, BATAN melakukan studi kelayakan tapak PLTN di Bangka Belitung.

Pemerintah kemudian kembali mengeluarkan Peraturan Pemerintah Nomor 79 Tahun 2014 yang menyatakan bahwa energi nuklir merupakan pilihan terakhir [6]. Presiden Joko Widodo selanjutnya memerintahkan Kementerian ESDM untuk menyusun peta jalan (*roadmap*) PLTN. Perintah ini tertuang dalam Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2017 tentang Rencana Umum Energi Nasional [7].

Negara-negara yang baru pertama kali akan membangun (PLTN) harus mempersiapkan 19 infrastruktur pendukung sesuai dengan panduan yang diterbitkan oleh IAEA. Terdapat 19 infrastruktur PLTN yang harus dipenuhi suatu negara jika ingin membangun PLTN. Ke 19 infrastruktur tersebut meliputi: posisi nasional, keselamatan nuklir, manajemen, pendanaan dan pembiayaan, kerangka legislatif, *seifgard*, kerangka peraturan, proteksi radiasi, jaringan listrik, sumber daya manusia, keterlibatan pemangku kepentingan, tapak dan fasilitas pendukung, proteksi lingkungan, perencanaan kedaruratan, keamanan, siklus bahan bakar, limbah radioaktif, keterlibatan industri, dan pengadaan [5].

### Media Massa (Pers) dan Berita

Pers mengandung dua arti. Arti sempit dan arti luas. Dalam arti sempit, pers hanya menunjuk kepada media cetak berkala: surat kabar, tabloid dan majalah. Sedangkan dalam arti luas, pers bukan hanya menunjuk pada media cetak berkala melainkan juga mencakup media elektronik auditif dan media elektronik audiovisual berkala yakni radio, televisi, film, dan media *online* internet. Pers dalam arti luas disebut media massa. Secara yuridis formal, seperti dinyatakan dalam Pasal 1 ayat (1) UU Pokok Pers No.40/1999, pers adalah lembaga sosial dan wahana komunikasi massa yang melaksanakan kegiatan jurnalistik meliputi mencari, memperoleh, memiliki, menyimpan, mengolah, dan menyampaikan informasi baik dalam bentuk tulisan, suara, gambar, suara dan gambar, serta data dan grafik maupun dalam bentuk lainnya dengan menggunakan media cetak, media elektronik, dan segala jenis saluran [11].

Berita adalah laporan tercepat mengenai fakta atau ide terbaru yang benar, menarik dan atau penting bagi sebagian besar khalayak, melalui media berkala seperti surat kabar, radio, televisi, atau media *online* internet. Dengan kata lain, berita bukan hanya menunjuk pada pers atau media massa dalam arti sempit dan "tradisional", melainkan juga pada radio, televisi film, dan internet atau media massa dalam arti luas dan modern. Berita, pada awalnya memang hanya "milik" surat kabar. Tetapi sekarang, berita juga menjadi "darah-daging" radio, televisi, dan internet. Tak ada media tanpa berita, sebagaimana halnya tak ada berita tanpa media. Berita telah tampil sebagai kebutuhan dasar (*basic need*) masyarakat modern di seluruh dunia [11].

### Analisis Isi

Analisis isi kuantitatif dapat didefinisikan sebagai suatu teknik penelitian ilmiah yang ditujukan untuk mengetahui gambaran karakteristik isi dan menarik inferensi dari isi. Analisis isi ditujukan untuk mengidentifikasi secara sistematis isi komunikasi yang tampak (*manifest*), dan dilakukan secara objektif, valid, reliabel, dan dapat direplikasi [4].

Salah satu ciri penting dari analisis isi adalah objektif. Penelitian dilakukan untuk mendapatkan gambaran isi suatu media apa adanya, tanpa adanya campur tangan dari peneliti. Penelitian menghilangkan bias, keberpihakan, atau kecenderungan tertentu dari peneliti. Hasil dari analisis isi adalah benar-benar tercerminkan isi dari suatu teks, dan bukan akibat dari subjektivitas (keinginan, bias, atau kecenderungan tertentu) dari peneliti. Ada dua aspek penting dari objektivitas, yakni validitas dan reliabilitas. Validitas berkaitan dengan apakah analisis isi mengukur apa yang benar-benar ingin diukur. Sementara reliabilitas berkaitan dengan apakah analisis isi akan menghasilkan temuan yang sama biarpun dilakukan oleh orang yang berbeda dan waktu yang berbeda. Sistematis bermakna semua tahapan dan proses penelitian telah dirumuskan secara jelas, dan sistematis. Sistematis ini juga berarti setiap kategori yang dipakai menggunakan suatu definisi tertentu, dan semua bahan dianalisis dengan menggunakan kategori dan definisi yang sama [4].

Salah satu ciri penting dari analisis isi yaitu harus bersifat replikabel. Penelitian dengan temuan tertentu dapat diulang dengan menghasilkan temuan yang sama pula. Hasil-hasil dari analisis isi sepanjang menggunakan bahan dan teknik yang sama, harusnya juga menghasilkan temuan yang sama. Temuan yang sama ini berlaku untuk peneliti yang berbeda, waktu yang berbeda, dan konteks yang berbeda. Ciri lainnya adalah isi yang tampak (*manifest*). Di antara para ahli, ada perbedaan dalam melihat apakah analisis isi hanya melihat isi tampak (*manifest*) ataukah juga dapat dipakai untuk melihat isi yang tidak tampak (*latent*). Neuendorf dan Krippendorff menyatakan bahwa analisis isi dapat dipakai untuk melihat semua karakteristik dari isi, baik yang tampak (*manifest*) ataupun yang tidak tampak (*latent*). Adapun Barelson, Holsti menilai bahwa analisis isi hanya dapat dipakai untuk menyelidiki isi yang tampak [4].

Ciri lain dari analisis isi yaitu ditujukan untuk membuat perangkuman (*summarizing*). Analisis isi umumnya dibuat untuk membuat gambaran umum karakteristik dari suatu isi/pesan. Analisis isi sebaliknya tidak berpretensi untuk menyajikan secara detail satu atau beberapa kasus isi. Analisis isi dapat dikategorikan sebagai penelitian yang bertipe nomotetik yang ditujukan untuk membuat generalisasi dari pesan, dan bukan penelitian jenis *idiographic* yang umumnya bertujuan membuat gambaran detail dari suatu fenomena. Analisis isi tidak hanya bertujuan untuk melakukan perangkuman (*summarizing*) tetapi juga

berpretensi untuk melakukan generalisasi. Ini terutama jikalau analisis isi menggunakan sampel [4].

Secara umum, dari berbagai jenis unit analisis yang ada dalam analisis isi, dapat dibagi ke dalam tiga bagian besar, yakni **unit sampel (*sampling units*)**, **unit pencatatan (*recording units*)**, dan **unit konteks (*context units*)**. Unit sampel adalah bagian dari objek yang dipilih (diseleksi) oleh peneliti untuk didalami. Unit sampel ini ditentukan oleh topik dan tujuan dari riset. Lewat unit sampel, peneliti secara tegas menentukan mana isi (*content*) yang akan diteliti dan mana yang tidak diteliti [4].

Unit pencatatan adalah unit analisis yang paling penting dalam analisis isi. Unit ini berkaitan dengan bagian apa dari isi yang akan dicatat, dihitung, dan dianalisis. Paling tidak ada lima jenis unit pencatatan (*recording units*) ini sebagai berikut:

1. Unit fisik: Unit fisik adalah unit pencatatan yang didasarkan pada ukuran fisik dari suatu teks. Bentuk ukuran fisik ini sangat tergantung kepada jenis teks. Untuk televisi, ukuran fisik ini misalnya dapat berupa waktu (durasi).
2. Unit sintaksis: Unit sintaksis adalah unit analisis yang menggunakan elemen atau bagian bahasa dari suatu isi. Elemen bahasa ini sangat tergantung kepada jenis teks.
3. Unit referensial: Unit referensial ini merupakan perluasan dari unit sintaksis. Pada unit sintaksis, yang dicatat dan dihitung adalah pemakaian dari kata atau kalimat.
4. Unit proposional: Unit proposional adalah unit analisis yang menggunakan pernyataan (proposisi). Peneliti menghubungkan dan mempertautkan satu kalimat dan kalimat lain dan menyimpulkan pernyataan (proposisi) yang terbentuk dari rangkaian antarkalimat ini.
5. Unit tematik: Sesuai namanya, unit tematik adalah unit analisis yang lebih melihat tema (topik) pembicaraan dari suatu teks. Unit tematik secara sederhana berbicara mengenai "teks berbicara tentang apa atau mengenai apa." Ia tidak berhubungan dengan kandungan kata atau kalimat seperti halnya dalam unit analisis sintaksis, proposional, dan referensial [4].

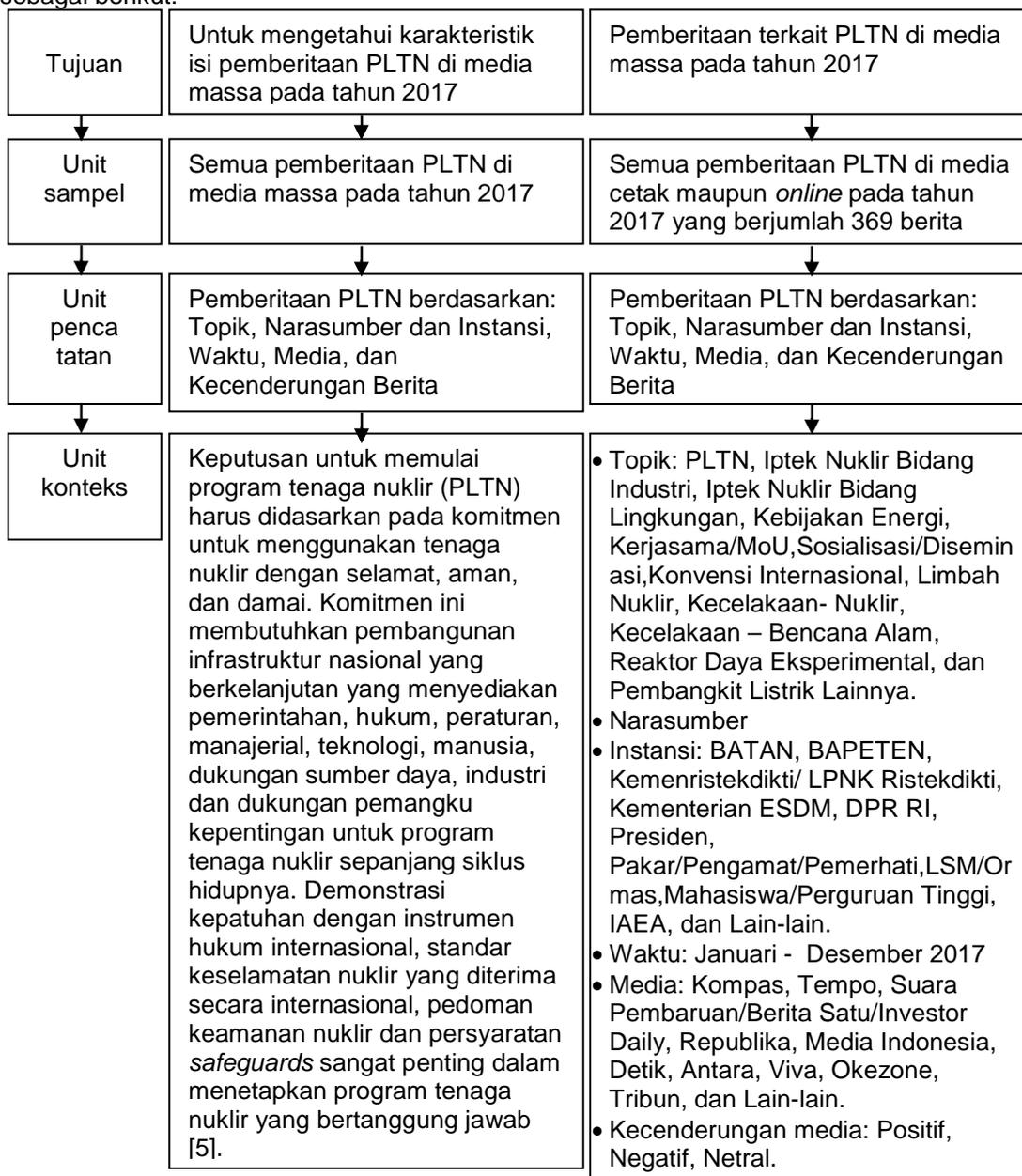
Unit analisis lain yang penting adalah unit konteks (*context units*). Unit ini kerap saling tumpang tindih dengan unit pencatatan (*recording units*). Tetapi, unit ini pasti lebih besar dibandingkan dengan unit pencatatan. Unit konteks dapat dipakai, tetapi dapat juga tidak dipakai oleh peneliti. Unit ini tidak perlu dipakai ketika unit pencatatan yang digunakan telah dapat menjawab tujuan penelitian. Sebaliknya, unit ini harus dipakai ketika data yang diperoleh dari hasil unit pencatatan, perlu diberikan konteks agar data ini mempunyai arti. Jika tidak diberikan konteks, maka analisis isi ini hanya seperti sekumpulan data (seperti, sekian persen dipakai kata ini, sekian persen dipakai kata itu). Unit sampel, pencatatan, dan konteks saling berkaitan satu sama lain. Masing-masing unit analisis ini harus didefinisikan secara jelas oleh peneliti sebelum mulai melakukan analisis isi. Unit ini menentukan isi apa yang dipilih (*sampling units*), bagian apa dari isi yang dicatat (*recording units*), dan bagaimana hasil pencatatan itu diberikan penilaian (*context units*) [4].

## METODOLOGI

Penelitian dilakukan sejak bulan Januari hingga bulan Desember 2017. Data yang digunakan pada penelitian ini adalah data sekunder, yakni hasil monitoring pemberitaan iptek nuklir, khususnya terkait PLTN di media massa yang dilakukan oleh Bagian Humas, Biro Hukum, Hubungan Masyarakat, dan Kerja Sama (BHKK) BATAN pada laman portal [www.batan.go.id/gunber](http://www.batan.go.id/gunber). Metodologi yang digunakan dalam penelitian ini adalah dengan menggunakan analisis isi pada pemberitaan tentang PLTN di media massa selama tahun 2017. Tahapan analisis isi terdiri dari: unit sampel (*sampling units*), unit pencatatan (*recording units*) dan unit konteks (*context units*). Adapun unit pencatatan (*recording units*) yang digunakan pada penelitian ini adalah menggunakan unit tematik.

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Penulis menjabarkan penelitian ini berdasarkan 3 jenis unit analisis, dengan tabel sebagai berikut:



Gambar 1. Unit analisis Isi Pemberitaan PLTN di Media Massa Pada Tahun 2017

Gambar diatas mendefinisikan secara jelas isi apa yang dipilih dalam penelitian ini (*sampling units*), bagian apa dari isi yang dicatat (*recording units*), dan bagaimana hasil pencatatan itu diberikan penilaian (*context units*) sebelum penulis melakukan analisis isi.

Dijelaskan pada gambar 1, tujuan penulis adalah ingin mengetahui karakterik isi pemberitaan PLTN di media massa pada tahun 2017. Namun pada unit sampling (*sampling units*), penulis melakukan penelitian pada semua pemberitaan di media cetak dan *online* pada tahun 2017 yang berjumlah 369 berita, untuk memberikan batasan yang jelas dalam penelitian ini.

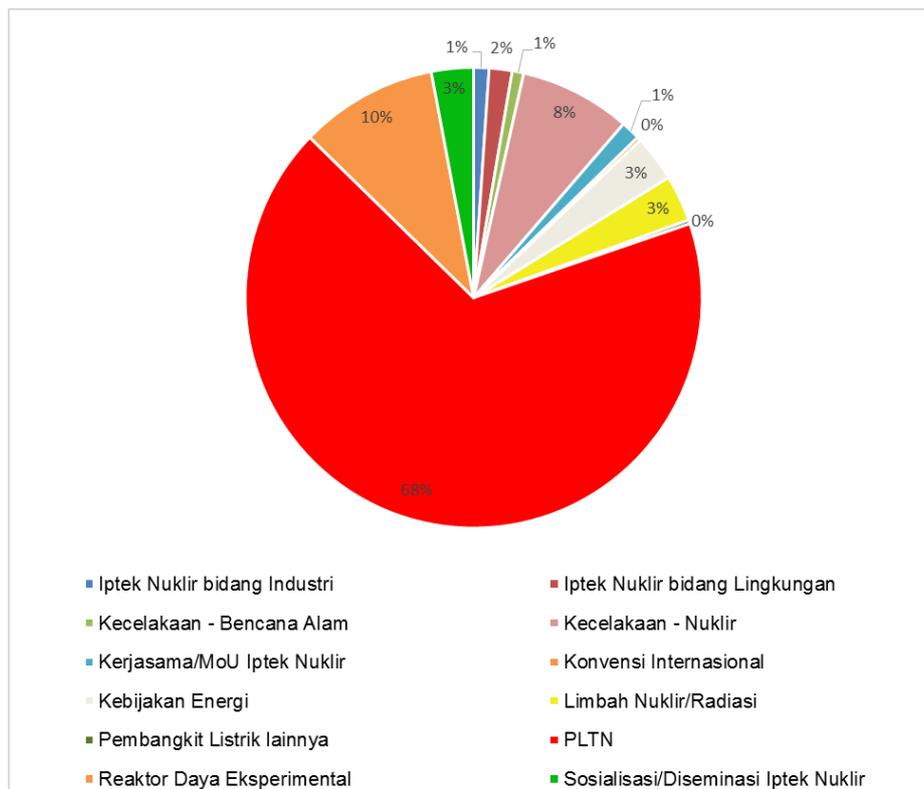
Kemudian pada unit pencatatan (*recording units*), penulis menggunakan jenis unit tematik. Sesuai namanya, unit tematik adalah unit analisis yang lebih melihat tema (topik) pembicaraan dari suatu teks. Unit tematik secara sederhana berbicara mengenai "teks berbicara tentang apa atau mengenai apa" [4]. Sedangkan pada unit konteks (*context units*),

penulis kaitkan dengan pengertian dan lingkup program PLTN itu sendiri menurut panduan IAEA dalam *IAEA Nuclear Energy Series*.

Maka di dalam unit pencacatan, penulis mengkategorikan pemberitaan tentang PLTN menjadi 12 topik, dan masing-masing topik penulis berikan unit konteks, yaitu:

1. PLTN, yaitu eksistensi dari PLTN itu sendiri
2. Iptek Nuklir Bidang Industri, yaitu iptek nuklir tentang industri yang berkaitan dengan PLTN
3. Iptek Nuklir Bidang Lingkungan, yaitu iptek nuklir tentang lingkungan yang berkaitan dengan PLTN
4. Kebijakan Energi, yaitu kebijakan Pemerintah RI terkait PLTN
5. Kerja sama/MoU, yaitu kerja sama/MoU terkait PLTN
6. Sosialisasi/diseminasi, yaitu sosialisasi/diseminasi terkait PLTN
7. Konvensi Internasional, yaitu konvensi internasional terkait PLTN
8. Limbah Nuklir/Radiasi, yaitu limbah nuklir terkait PLTN
9. Kecelakaan - Nuklir, yaitu kecelakaan nuklir yang berkaitan dengan PLTN
10. Kecelakaan – Bencana Alam, yaitu kecelakaan PLTN yang diakibatkan oleh bencana alam
11. Reaktor Daya Eksperimental, yaitu adalah reaktor yang sifatnya eksperimental yang dapat digunakan untuk pembangkit listrik, pembangkit panas dan untuk memproduksi hidrogen [2].
12. Pembangkit Listrik Lainnya, yaitu pemberitaan pembangkit listrik lainnya yang dikaitkan pula dengan PLTN

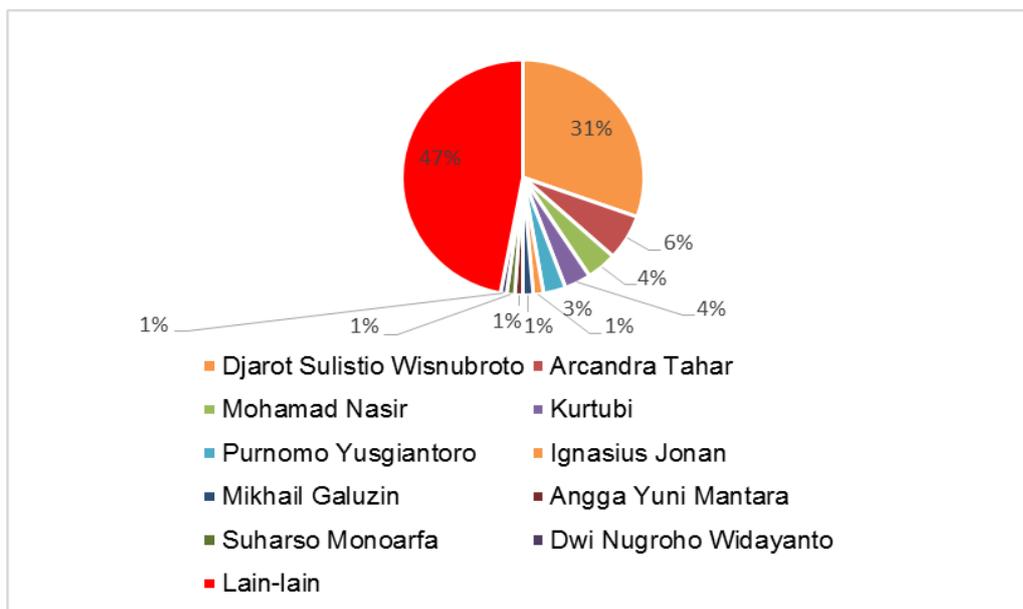
Dari unit pencatatan yang penulis lakukan terhadap pemberitaan terkait PLTN sepanjang tahun 2017 yang berjumlah 369 berita di media cetak dan *online*, penulis memperoleh hasil dan pembahasan sebagai berikut:



Gambar 2. Tema yang Diangkat terkait Pemberitaan PLTN

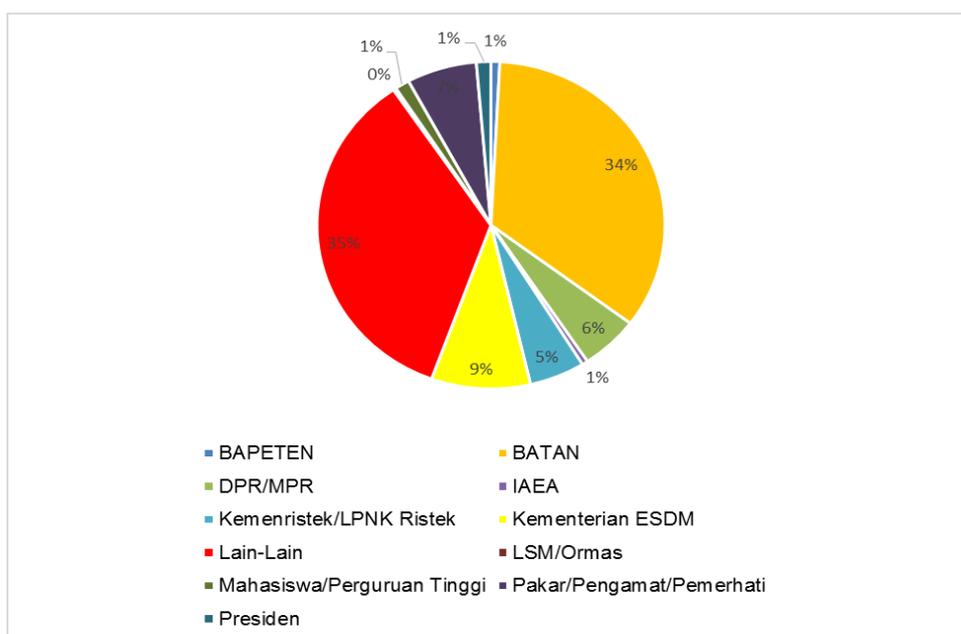
Gambar 2 menunjukkan tema yang diangkat terkait pemberitaan PLTN di media cetak dan *online* sepanjang tahun 2017. Dari 12 tema yang diambil, terdapat 3 besar pemberitaan yang mendominasi. Sebanyak 68% pemberitaan mengenai eksistensi atau keberadaan dari PLTN itu sendiri, kemudian diikuti 10% pemberitaan mengenai Reaktor Daya Eksperimental, dan 8% pemberitaan mengenai kecelakaan nuklir. Kemudian 3 besar berikutnya yaitu

sebanyak masing-masing 3% pemberitaan terkait Kebijakan Energi, Limbah Nuklir/Radiasi, dan Sosialisasi/Diseminasi Iptek Nuklir terkait PLTN.



Gambar 3. Narasumber Pemberitaan PLTN

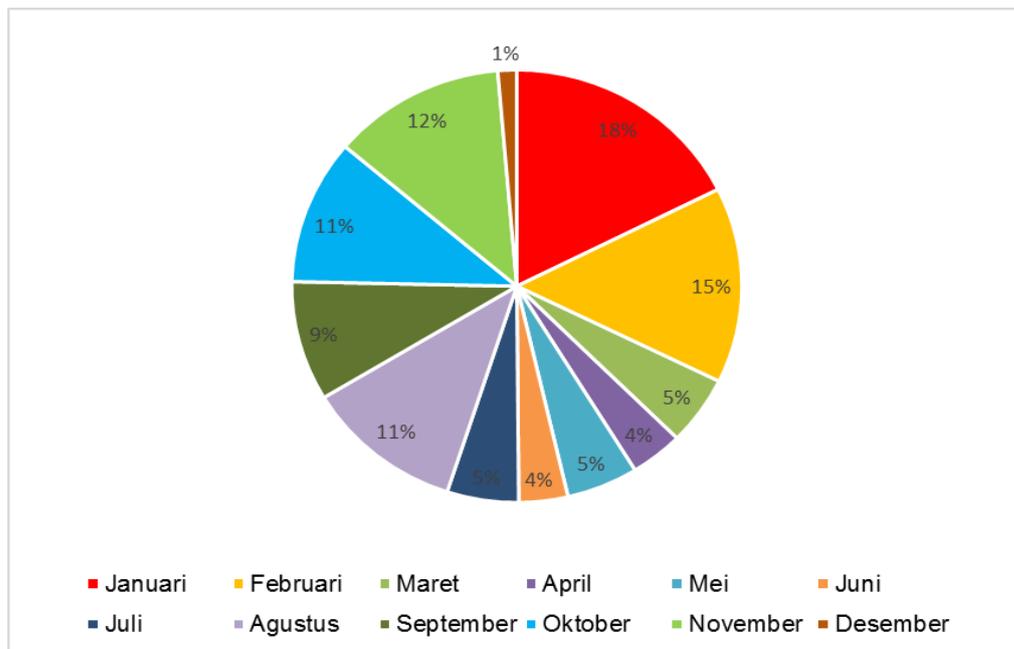
Narasumber adalah orang yang dijadikan sumber pemberitaan di media. Pada pemberitaan PLTN, seperti yang terlihat pada Gambar 3, penulis menyederhanakan gambar dengan mengambil 10 nama yang paling banyak dijadikan narasumber pemberitaan PLTN. Sedangkan untuk narasumber-narasumber lainnya yang tentunya tidak dapat penulis rangkum dalam satu gambar, penulis kategorikan menjadi kategori "Lain-Lain". Pada gambar 3, terlihat bahwa sebanyak 47% narasumber adalah kategori Lain-Lain, kemudian 31% narasumber adalah Djarot Sulistio Wisnubroto. Narasumber terbanyak berikutnya adalah sebanyak 6% Arcandra Tahar, dan masing-masing 4% adalah Mohamad Nasir dan Kurtubi.



Gambar 4. Instansi Narasumber

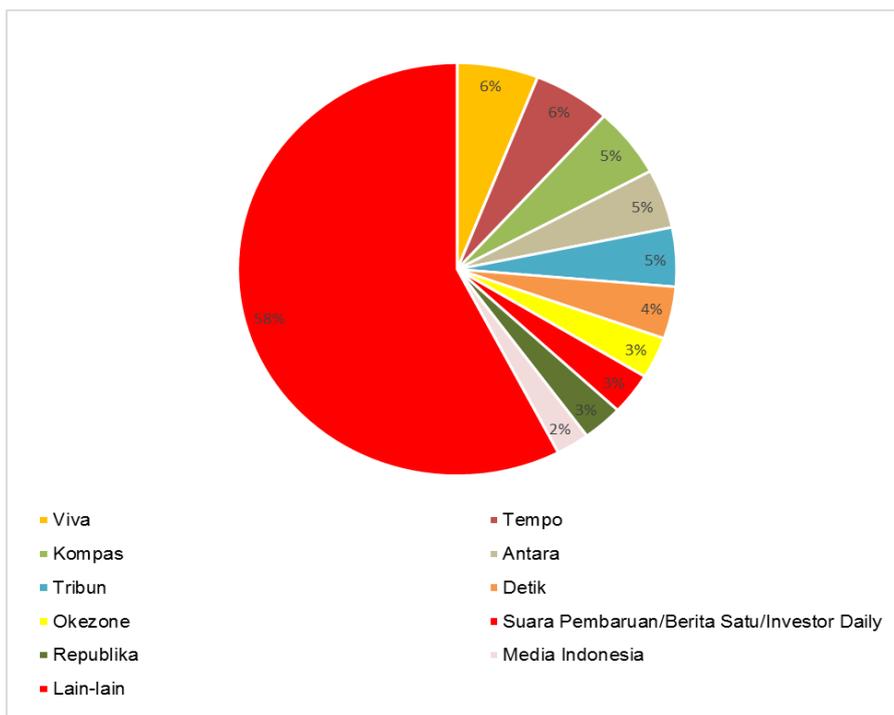
Gambar 4 menunjukkan instansi narasumber terkait pemberitaan PLTN. Seperti halnya pencacatan pada grafik Narasumber, penulis menyederhanakan gambar dengan

mengambil 10 instansi yang paling banyak dijadikan narasumber. Sedangkan instansi-instansi narasumber lainnya yang tentunya tidak dapat penulis rangkum dalam satu gambar, maka penulis kategorikan menjadi kategori "Lain-Lain". Pada gambar 4, terlihat bahwa sebanyak 35% instansi Lain-Lain menjadi narasumber pada pemberitaan mengenai PLTN. Hanya selisih 1%, yaitu sebanyak 34% instansi BATAN menjadi narasumber pada pemberitaan PLTN. Kemudian 9% berasal dari instansi Kementerian ESDM, dan 6% berasal dari instansi DPR/MPR. Selisih 1% dari DPR/MPR yaitu sebanyak 5% berasal dari Kementerian Ristek/LPNK Ristek.



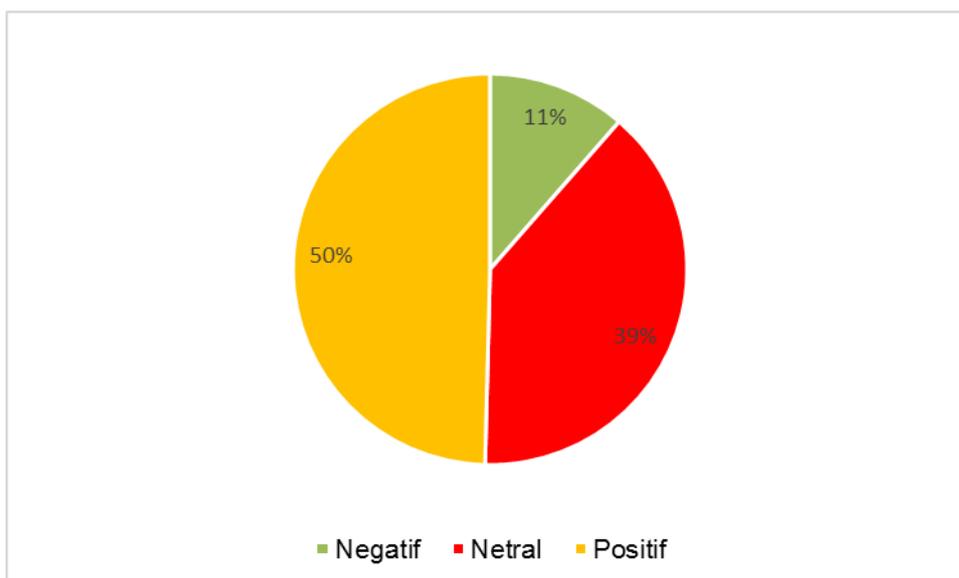
Gambar 5. Bulan Pemberitaan terkait PLTN

Gambar 5 menunjukkan prosentase pemberitaan terkait PLTN dari bulan Januari hingga bulan Desember 2017. Dari grafik tersebut, terlihat bahwa 18% pemberitaan terkait PLTN mendominasi di bulan Januari, kemudian disusul 15% pada bulan Februari, 12% pada penghujung tahun, yaitu bulan November, dan 11% masing-masing pada triwulan ke - III dan ke - IV, yaitu bulan Agustus dan Oktober.



Gambar 6. Media yang Memberitakan Terkait PLTN

Gambar 6 menunjukkan media yang memberitakan terkait PLTN. Seperti halnya Narasumber dan Instansi Narasumber, penulis menyederhanakan gambar dengan menunjukkan 10 media yang paling banyak memberitakan tentang PLTN, sedangkan media-media lainnya penulis sederhanakan menjadi kategori "Lain-Lain". Dari gambar tersebut, dapat dilihat bahwa lebih dari separuh pemberitaan yang muncul sepanjang tahun 2017, baik dari media cetak maupun *online*, berasal dari media dengan kategori Lain-Lain, yakni sebanyak 58%. Kemudian, media yang paling banyak memberitakan terkait PLTN adalah Viva dan Tempo dengan masing-masing 6%, serta Kompas, Antara, dan Tribun, dengan masing-masing 5%.



Gambar 7. Kecenderungan Nilai Berita terkait PLTN

Gambar 7 menunjukkan kecenderungan nilai berita terkait PLTN. Dari gambar tersebut, dapat terlihat bahwa separuh pemberitaan atau 50% bernilai positif, hanya 11% bernilai negatif, dan 39% bernilai netral bagi instansi BATAN.

## KESIMPULAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik isi dari pemberitaan terkait PLTN di media massa pada tahun 2017. Berdasarkan analisis isi yang dilakukan penulis, diperoleh kesimpulan karakteristik isi dari pemberitaan di media terkait PLTN adalah sebagai berikut:

1. Topik yang paling banyak diangkat dalam memberitakan PLTN adalah mengenai eksistensi atau keberadaan PLTN itu sendiri yakni sebesar 68%, kemudian Reaktor Daya Eksperimental sebesar 10%, dan Kecelakaan Nuklir sebesar 8%.
2. Narasumber yang paling banyak dijadikan sumber berita dalam pemberitaan terkait PLTN adalah narasumber dalam kategori "Lain-Lain" yakni sebesar 47%, kemudian Djarot Sulistio Wisnubroto sebesar 31%, dan Arcandra Tahar sebesar 6%.
3. Instansi narasumber yang paling banyak dijadikan sumber berita terkait PLTN adalah instansi dalam kategori "Lain-Lain" sebesar 35%, kemudian instansi BATAN sebesar 34% dan Kementerian ESDM sebesar 6%.
4. Bulan pemberitaan terkait PLTN sepanjang tahun 2017 paling banyak muncul di bulan Januari yakni sebesar 18%, Februari sebesar 15%, dan November sebesar 12%.
5. Media yang paling banyak memberitakan terkait PLTN adalah media dalam kategori "Lain-Lain" yakni sebesar 58%, kemudian Viva dan Tempo dengan masing-masing sebesar 6%.
6. Separuh kecenderungan nilai pemberitaan terkait PLTN bernilai positif yakni sebesar 50%, 11% bernilai negatif, dan 39% bernilai netral bagi instansi BATAN.

Berdasarkan kesimpulan di atas, penulis memberikan saran terkait pemberitaan PLTN, khususnya kepada BATAN, yaitu:

1. Penelitian ini perlu dilanjutkan dengan kajian lebih mendalam mengenai pemberitaan terkait PLTN, misalnya dengan menggunakan jenis analisis isi lainnya seperti semiotika, *framing*, wacana, naratif dan sebagainya, untuk memberikan gambaran yang lebih detail dan mendalam.
2. Penelitian ini perlu ditingkatkan, misalnya dengan memperluas cakupan pemberitaan PLTN pada media massa selain media cetak dan *online*, seperti media televisi, radio, atau media sosial.
3. BATAN sebagai lembaga penelitian dan pengembangan yang salah satu misinya adalah melaksanakan diseminasi iptek nuklir dengan menekankan pada asas kemanfaatan, keselamatan dan keamanan, perlu lebih meningkatkan diseminasi melalui pemberitaan di berbagai media.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada rekan-rekan di BATAN, terutama di Bagian Hubungan Masyarakat – BHHK, yang telah membantu dalam melakukan penelitian ini, terutama dalam membantu penulis dalam pengumpulan data penelitian selama tahun 2017. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada rekan-rekan media yang telah turut membantu dalam mendiseminasikan iptek nuklir di Indonesia untuk tujuan damai.

## DAFTAR PUSTAKA

1. BATAN, "BATAN 55 Tahun: Persembahan untuk Negeri", PDIN – BATAN, Hal. 144 - 152, Jakarta (2013).
2. BATAN, "Reaktor Daya Eksperimental," <http://www.batan.go.id/index.php/id/reaktor-daya-eksperimental-rde>. Diakses tanggal 22 Juli 2018.
3. ELFISHA, MIKO, "Dewan Pers: Jumlah Media Massa di Indonesia Capai 47.000", <https://lampung.antaranews.com/berita/302445/dewan-pers-jumlah-media-massa-di-indonesia-capai-47000>. Diakses tanggal 22 Juli 2018.
4. ERIYANTO, "Analisis Isi, Pengantar Metodologi untuk Penelitian Ilmu Komunikasi dan Ilmu – Ilmu Sosial Lainnya", Hal. 15 – 102, Prenada Media, Jakarta (2015).
5. IAEA, "IAEA Nuclear Energy Series, Milestones in the Development of a National Infrastructure for Nuclear Power", [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1704\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1704_web.pdf), Hal. 1 - 62, Vienna (2015).
6. KEMENKUMHAM, "Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional", Hal. 10, Jakarta (2014).

7. KEMENKUMHAM, "Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2017 tentang Rencana Umum Energi Nasional", Hal. 27, Jakarta (2017).
8. KEMENKUMHAM, "Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 17 Tahun 2007 tentang Rencana Pembangunan Jangka Panjang Nasional Tahun 2005 – 2025", Hal. 81, Jakarta (2007).
9. KEMENSETNEG, "Undang-Undang Nomor 40 Tahun 1999 tentang Pers", Hal. 2, Jakarta (1999).
10. PRIAADI, YUDO DWINANDA, "Indonesia Energy Policy, Nuclear Energy Opportunity", World Nuclear Spotlight Indonesia, Jakarta (2018).
11. SUMADIRIA, AS HARIS, "Jurnalistik Indonesia, Menulis Berita dan Feature", Simbiosis Rekatama Media, Hal. 31 - 65, Bandung (2016).
12. WIKIPEDIA, "Indonesia", <https://id.wikipedia.org/wiki/Indonesia>. Diakses tanggal 22 Juli 2018.
13. WIKIPEDIA, "Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir", [https://id.wikipedia.org/wiki/Pembangkit\\_listrik\\_tenaga\\_nuklir](https://id.wikipedia.org/wiki/Pembangkit_listrik_tenaga_nuklir). Diakses tanggal 22 Juli 2018.

## PERAWATAN DAN UJI FUNGSI RUTIN SISTEM AIR PENDINGIN SIKLOTRON CS-30 BATAN

**Rustama, Parwanto, Edi Slamet R.**

*Pusat Teknologi Radioisotop dan Radiofarmaka, Badan Tenaga Nuklir Nasional  
Gedung 11, Kawasan Puspiptek Serpong, Tangerang Selatan*

*E-mail : [rustama@batan.go.id](mailto:rustama@batan.go.id)*

### ABSTRAK

**PERAWATAN DAN UJI FUNGSI RUTIN SISTEM AIR PENDINGIN SIKLOTRON CS-30 BATAN.** Telah dilakukan perawatan dan uji fungsi rutin sistem aliran air pendingin pada siklotron CS-30 BATAN. Perawatan dan uji fungsi secara rutin ini dilakukan untuk mempetahankan kinerja sistem. Kegiatan perawatan dan pengujian ini jika tidak dilakukan secara rutin, maka dikhawatirkan akan terjadi unscheduled shutdown yang tidak dikehendaki yang dapat merugikan sistem secara keseluruhan. Kegiatan perawatan di sini diantaranya adalah melakukan penjadwalan, pengecekan rutin dan penggantian komponen sesuai umur pakai dan kondisi dari masing masing komponen berdasarkan spesifikasinya. Sedangkan kegiatan pengujian adalah dengan melakukan pengoperasian sistem secara berkala yang kemudian hasilnya dibandingkan dengan kondisi spesifikasinya. Kegiatan pengujian ini diantaranya adalah pengujian aliran air pendingin, pengujian valve- valve, pengujian pompa air, dan pengujian fungsi kerja keseluruhan sistem air pendingin secara terpadu. Kegiatan ini dimaksudkan dengan tujuan sistem air pendingin dapat bekerja dengan baik. Dari kegiatan ini diperoleh bahwa sistem air pendingin dan kinerja keseluruhan komponen sistem air pendingin secara terpadu masih dapat berfungsi secara optimal.

**Kata kunci :** siklotron CS-30, saluran berkas, Perawatan, dan Uji fungsi

### ABSTRACT

**ROUTINE MAINTENANCE AND FUNCTION TEST OF BATAN'S CS-30 CYCLOTRON COOLING WATER SYSTEM.** Routine maintenance and functions test of BATAN's CS-30 cyclotron of the cooling water flow system has been conducted. These maintenance and function test is conducted to maintain the performance of the system. If these maintenance and testing is not routinely done, it will cause an unscheduled shutdown that can harm the system as a whole. The activities of the maintenance such as scheduling, regular checks and replacement of the components according to the its life time and the condition of each component based on the its specifications. While the testing activities are done by conducting periodically the operation of the system which the results are then compared with the conditions of the its specifications. This test activities including the cooling water flow testing, valves testing, water pump testing, and integrated testing of the overall working function of the cooling water system. This activity is intended that when the system is used both for the cyclotron beam function test and iradasi target purposes, the performance of cooling water system can function properly. From these activities shows that the the cooling water system and the overall performance of cooling water system components in an integrated manner can still function optimally.

**Keywords:** Cs-30 Cyclotron, cooling water system, Maintenance, and Function test.

## PENDAHULUAN

Siklotron CS-30 yang berada di Pusat Teknologi Radioisotop dan Radiofarmaka-BATAN adalah siklotron yang telah dimodifikasi dari pemercepat ion positif menjadi pemercepat ion negatif. Sebelum dimodifikasi siklotron CS-30 mampu menghasilkan energi berkas proton dengan nilai tetap (*fixed energy*), yaitu sebesar 26,5 MeV. Setelah dilakukan modifikasi siklotron CS-30 mampu menghasilkan energi berkas proton yang dapat divariasikan dari 24 MeV hingga 27 MeV. Dengan kemampuan menghasilkan energi berkas proton 24 MeV hingga 27 MeV maka siklotron CS-30 dapat diaplikasikan untuk pengembangan radionuklida sebagai penandaan radiofarmaka tertentu untuk keperluan diagnosa pada organ tubuh yang mengalami kelainan fungsi.<sup>[1,10]</sup>

Kendala dalam pengoperasian CS-30 adalah usianya sudah cukup tua. Oleh karena itu untuk memastikan siklotron CS-30 dapat beroperasi maka diperlukan uji sistem untuk melihat apakah ada komponen yang telah mencapai umur pakainya atau ditemukan adanya gejala yang dapat mengakibatkan kerusakan pada komponen, peralatan ataupun sistem, maka akan segera dilakukan penggantian komponen atau diupayakan untuk dapat menghilangkan gejala kerusakan tersebut dan memulihkan kondisi peralatan sedini mungkin. Salah satu uji sistem yang dapat melihat kelayakan komponen adalah uji sistem air pendingin. Hal ini karena sistem pendingin pada siklotron sangat diperlukan untuk menjaga sub system siklotron agar tetap dingin dan stabil suhunya serta tidak mengalami panas berlebih yang dapat menurunkan kinerja sub system tersebut.

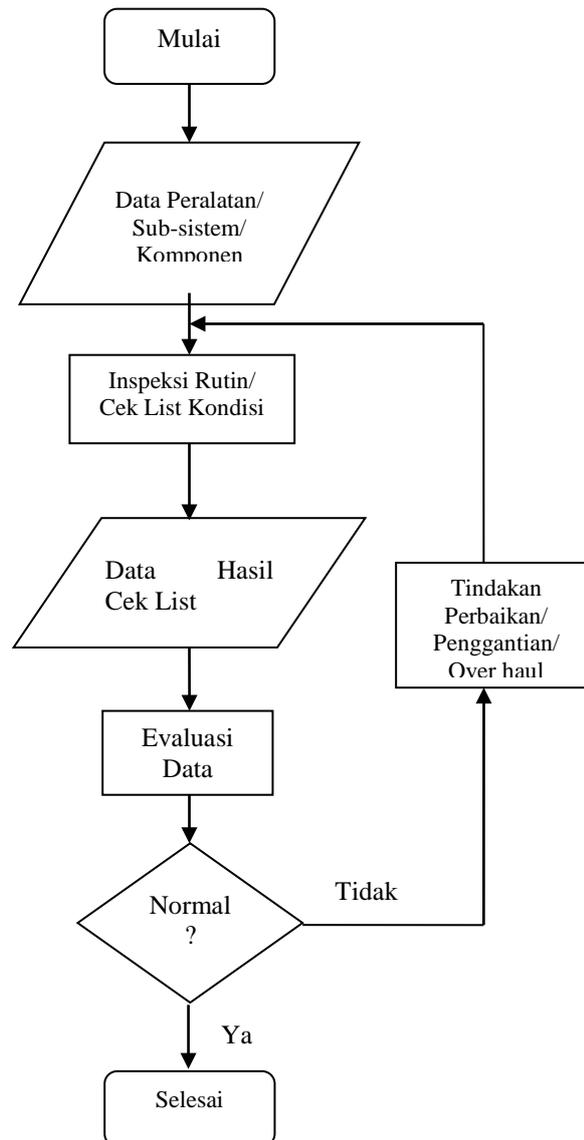
Oleh karena itu pada makalah ini akan disampaikan perawatan dan uji fungsi rutin sistem air pendingin pada siklotron CS-30 BATAN ini, meliputi identifikasi semua peralatan subsistem maupun komponen sistem air pendingin, penyusunan program perawatan dan pengujian, pelaksanaan program perawatan dan pengujian, pengambilan data dan analisa data dari program perawatan serta uji rutin kinerja sistem air pendingin. Diharapkan dari hasil ini dapat diperoleh kondisi komponen CS-30 yang masih berfungsi dengan baik dan yang sudah mengalami penurunan fungsi.

## TEORI

Sistem air pendingin siklotron CS-30 adalah merupakan suatu perangkat peralatan ataupun komponen yang digunakan untuk mengalirkan air pendingin yang akan mendinginkan pompa vakum pada sistem vakum, sistem *power supply* magnet, sistem *anode power supply*, sistem koil magnet, sistem pembangkit radiofrekuensi (RF), sistem sumber ion, sistem pengukur arus berkas, sistem pada stasiun target. Sistem pendingin pada Siklotron sangat diperlukan untuk menjaga sub sistem siklotron agar tetap dingin dan stabil suhunya serta tidak mengalami panas yang berlebih, yang dapat menurunkan kinerja dari sub sistem tersebut. Panas yang terjadi pada sub-sub sistem Siklotron cs-30 berbeda-beda, hal ini disebabkan konsumsi daya listrik masing masing sub sistem berbeda. Air pendingin berasal dari *chiller* kemudian di alirkan ke sub-sub sistem Siklotron cs-30 dengan debit dan kecepatan sesuai dengan jumlah pendinginan yang dibutuhkan. Pada siklotron CS-30 BATAN menggunakan sistem sirkulasi tertutup dirancang untuk dua mode operasi. Mode aliran tinggi memasok sekitar 227 LPM (60 GPM) air pendingin deionisasi (*deionized water cooling*) dan menghilangkan panas 172.080 kkal / jam (200 kW) pada saat siklotron beroperasi. Mode siaga menyediakan sekitar 20 LPM (5 GPM) air pendingin untuk mempertahankan pompa vakum saat siklotron tidak beroperasi. Dalam mode siaga, katup solenoid di jalur menuju magnet siklotron, catu daya anoda dan catu daya magnet tertutup.<sup>[2,7]</sup>

Sistem pendingin ini terdiri dari pompa aliran tinggi dan rendah, *deionizer water column*, penampung air, penukar panas, meter resistivitas dan sensor, kontrol, katup, dan sistem pemipaan yang terkait.<sup>[2]</sup>

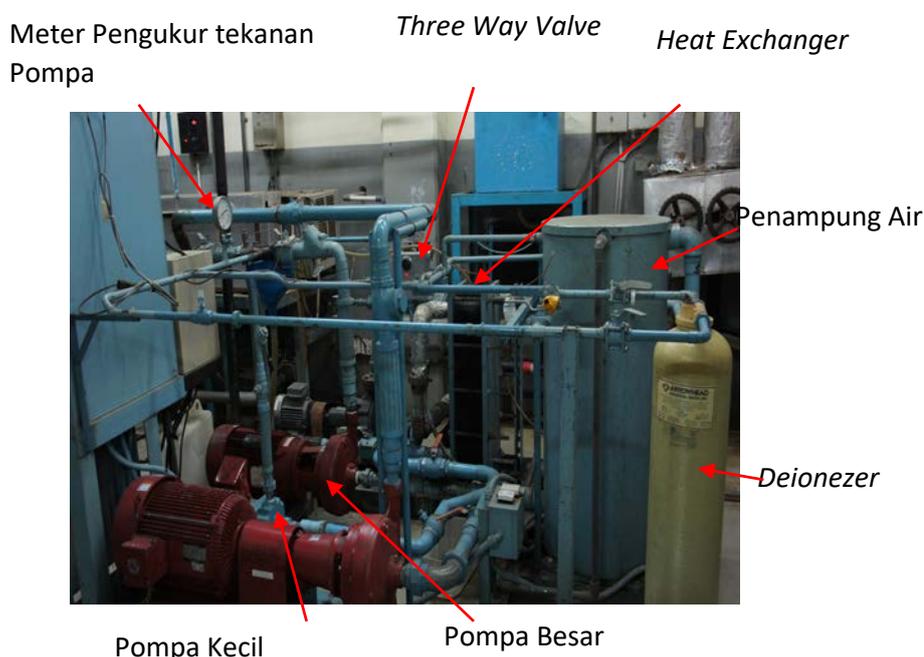
## METODOLOGI



Gambar 1. Diagram alir dari pelaksanaan program perawatan dan uji pengoperasian sistem air pendingin siklotron CS-30 BATAN.

Kegiatan ini dilakukan di Fasilitas siklotron pada sub bidang pengelolaan fasilitas aktivasi, PTRR-BATAN. Waktu pelaksanaan kegiatan adalah pada periode bulan Maret hingga Juni 2018. Dalam kegiatan ini dilakukan secara rutin pengoperasian sistem air pendingin, selama kurang lebih 8 jam setiap hari. Pada kegiatan ini juga dilakukan uji pengoperasian dan pengamatan pada saluran air pendingin dan katup katup yang terpasang. Hasil pengujian dan pengamatan yang didapatkan kemudian dievaluasi untuk menentukan langkah tindakan selanjutnya, misalnya terdapat komponen atau kinerja sistem ada yang bermasalah atau nilai yang diperoleh tidak sesuai dengan spesifikasinya, maka dapat segera dilakukan tindakan penggantian komponen, penyetelan (*tunning*) atau perbaikan. Langkah pengoperasian, pengamatan dan tindakan perbaikan ditunjukkan dalam diagram alir pada Gambar 1.

## HASIL DAN PEMBAHASAN



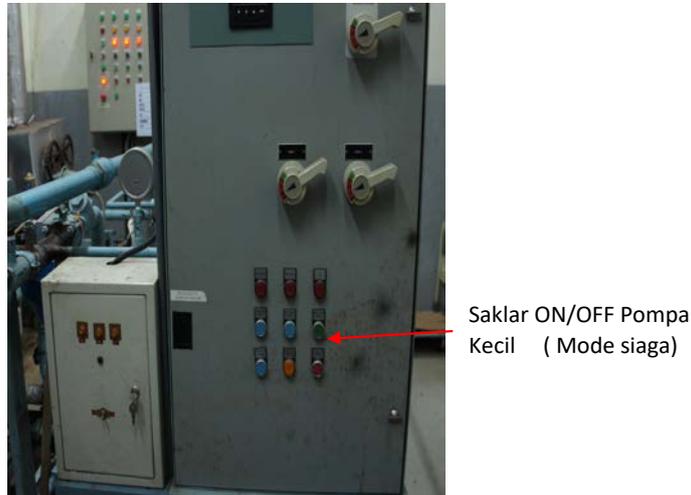
Gambar 2. : Sistem air pendingin Siklotron CS-30 BATAN

Pada gambar-2 ditampilkan sistem pendingin siklotron CS-30 yang diuji fungsinya, dimana hasil pengujiannya ditampilkan pada tabel-1 berupa hasil *check-list* dari kondisi peralatan atau komponen dari sistem air pendingin siklotron, yaitu diantaranya adalah *flow switch supply*, *flow switch return*, *three way valve*. Hasil *check-list* menunjukkan bahwa dari ketiga komponen tersebut yaitu *flow switch supply*, *flow switch return*, *three way valve* masih berfungsi dengan baik. Hal ini dapat diketahui pada saat dilakukan uji pengoperasian dari masing-masing komponen tersebut menunjukkan fungsi yang normal. Pemantauan dari ketiga komponen sistem air pendingin ini dilakukan dua kali setiap minggunya, sehingga total data pemantauan masing-masing ada 35 kali. Kemudian ke 35 data *check-list* pengoperasian tersebut dievaluasi setiap 5 data, sehingga dalam kurun waktu 4 bulan pengamatan tersebut terdapat 7 kelompok pengamatan. Dari hasil pengamatan tersebut dapat disimpulkan bahwa ketiga komponen *flow switch supply*, *flow switch return*, *three way valve* masih dalam kondisi bagus.

Tabel-1 : Hasil uji pergerakan dari komponen *flow switch supply*, *flow switch return*, *three way valve* selama 4 bulan pemantauan.

No.	<i>flow switch supply</i>		<i>flow switch return</i>		<i>Three way Valve</i>	
	Ready	Tidak	Ready	Tidak	Ready	Tidak
1	√		√		√	
2	√		√		√	
3	√		√		√	
4	√		√		√	
5	√		√		√	
6	√		√		√	
7	√		√		√	

Sedangkan uji pengoperasian dan pengamatan kinerja dari pompa kecil, pompa besar serta pengukuran suhu masuk dan keluar sistem Siklotron. Pada Tabel-2. Menunjukkan hasil pengamatan tekanan pompa air pendingin baik pada saat menggunakan pompa kecil maupun pompa besar, pengukuran suhu air pendingin yang menuju sistem siklotron maupun yang dari sistem siklotron, serta resistivity dan candangan dari air pendingin yang masih dalam rentang nilai yang ditetapkan.



Gambar 3. Sistem Kontrol air pendingin pada siklotron CS-30 BATAN mode siaga.

Kontrol ON/OFF Pompa Besar ( Mode Siklotron Operasi)



Gambar 4. Sistem Kontrol air pendingin pada siklotron CS-30 BATAN mode operasi.

Tabel-2 : Data Pengamatan pada saat pengoperasian pompa pada sistem air pendingin.

No.	Tekanan Pompa Besar (80-120 Psig)	Tekanan Pompa Kecil (15-25 Psig)	Suhu Outlet Pendingin (55-74 °F)	Suhu Inlet Pendingin °F	Resativity ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) $\leq 5 \mu\text{S}$	PH	Level air di reservoir $\geq 50 \text{ cm}$
1	98	18	58	72	0.865	5	70
2	98	19	62	72	0.890	5	68
3	98	18	60	72	0.925	5	70
4	100	19	56	72	0.880	5	72
5	98	18	60	72	0.875	5	74
6	98	18	58	72	0.920	5	72
7	98	18	64	72	0.925	5	72

## KESIMPULAN

Dari hasil perawatan dan uji fungsi rutin pengoperasian sistem air pendingin, diperoleh bahwa sistem air pendingin dan kinerja keseluruhan komponen sistem air pendingin secara terpadu masih dapat berfungsi secara optimal.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kepala Sub Bidang Pengelolaan Fasilitas Aktivasi, Bapak Aceu Turyana selaku Kepala Bidang Pengelolaan Fasilitas Proses Radioisotop dan PTRR-BATAN selaku institusi yang menaungi kegiatan ini serta kepada semua pihak yang telah membantu terlaksananya penulisan makalah ini.

## DAFTAR PUTAKA

1. Parwanto, dkk. Perawatan Dan Uji Fungsi Rutin Sistem Saluran Berkas Utama Siklotron Cs- 30 BATAN. Prosiding Pertemuan Ilmiah Tahunan 2016, Pusat Teknologi Radioisotop dan Radiofarmaka- BATAN, 3 November 2016. ISSN : 2087 : 9652
2. ANONIM., *Operating and Service Manual for CS-30 Cyclotron.*, Computer Technology and Imaging (CTI), Berkeley, California, USA (1985).
3. Mukhammad cholil, Suyamto, Suprpto, Rancangan Awal Sistem Pendingin Pada Siklotron DECY 13 MeV, *Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Teknologi Akselerator dan Aplikasinya Vol. 13, Januari 2012 : 17 –24.* ISSN 1411-1349
4. ANONIM., *Operating and Service Manual for CP-42 Cyclotron.*, Computer Technology and Imaging (CTI), Berkeley, California, USA(1982).
5. Rian Suryo Darmawan , Kurnia Wibowo. Perancangan dan Simulasi Jalur Pendingin Komponen Cavity Sistem RF Siklotron 13 MeV. Prosiding Pertemuan Ilmiah Tahunan 2016, Pusat Teknologi Radioisotop dan Radiofarmaka- BATAN, 3 November 2016. ISSN : 2087 : 9652
6. Ferdi Dwi Listiawadi, dkk. Evaluasi Hasil Produksi Radionuklida F-18 Dari Target Air Diperkaya O-18 Menggunakan Siklotron Eclipse 11MeV Di Rumah Sakit kanker Dharmais. Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Teknologi Akselerator dan Aplikasinya Vol. 17, November 2015 ; 43-49. ISSN 1411-1349
7. SURYANTO, H., *Komponen Utama Siklotron.*, Pelatihan Petugas Siklotron., Pusdiklat-BATAN (2014). ISSN:0854-7777
8. Hari Suryanto, dkk. 2009 Overhaul Siklotron CS-30 BATAN : Suatu Upaya Untuk Pemulihan Kinerja Dan Fungsi Operasinya. Kolokium Siklotron, Radiosotop dan Radiofarmaka, PRR-BATAN
9. Edi Trijono Budisantoso, Suprpto, Sutadi, Kinerja Instalasi Pendingin Siklotron Decy-13, *Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Teknologi Akselerator dan Aplikasinya Vol. 17, November 2015 : 50 – 55.* ISSN 1411-1349
10. Herta Astarina, Hari Suryanto, Parwanto.. Pelaksanaan Preventive Maintenance Untuk Mempertahankan Fungsi Operasi Siklotron Di rumah Sakit Kanker Darmais. Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Teknologi Akselerator dan Aplikasinya Vol. 16, Oktober 2014 : 82 – 88. . ISSN 1411-1349
11. Bambang Murjati, Harsono, Royadi, Amril. Investigasi penyebab gangguan operasi Sistem Pendingin Sekunder Reaktor GA Siwabessy. *Prosiding Seminar Nasional Teknologi dan Aplikasi Reaktor Nuklir PRSG Tahun 2012.* ISBN 978-979-17109-7-8 Saminto, Slamet Santoso. Rancangan Sistem Proteksi Dan Interlock Mesin Siklotron Decy-13.
12. *Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Teknologi Akselerator dan Aplikasinya, Vol. 14, November 2012 : 129 – 137.* ISSN 1411-1349

## FASILITAS DAUR BAHAN BAKAR NUKLIR

Nurlaila<sup>1</sup>, Dharu Dewi<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> PKSEN BATAN, jalan Kuningan Barat, Mampang Prapatan, Jakarta 12710  
email: alialrun@batan.go.id

### ABSTRAK

**FASILITAS DAUR BAHAN BAKAR NUKLIR.** Fasilitas daur bahan bakar nuklir diperlukan untuk manufaktur bahan bakar nuklir. Status terkini ketersediaan fasilitas daur bahan bakar nuklir sangat penting tidak hanya untuk pemenuhan kebutuhan pengembangan tenaga nuklir secara global tetapi juga difokuskan untuk jaminan pasokan bahan bakar nuklir. Industri daur bahan bakar nuklir terdiri dari skala komersial, *pilot project* dan laboratorium. Makalah ini memberikan data dan informasi mengenai data base industri daur bahan bakar nuklir di dunia. Tujuan penulisan makalah adalah mengidentifikasi jenis dan jumlah fasilitas daur bahan bakar nuklir yang dimiliki negara-negara di dunia. Metodologi yang digunakan adalah mengumpulkan data dan informasi tentang fasilitas daur bahan bakar nuklir di dunia dari direktori *Nuclear Fuel Cycle Information System* tahun 2012 dan selanjutnya diinput menggunakan *spreadsheet* (program excel) untuk menggambarkan model jumlah fasilitas bahan bakar nuklir di dunia sehingga dapat dibandingkan dari masing-masing negara. Hasil menunjukkan bahwa fasilitas daur bahan bakar nuklir di dunia dari berbagai jenis dan skala berjumlah 715 unit. Jenis fasilitas daur bahan bakar nuklir terbanyak adalah produksi uranium yaitu 233 (33,58%), yang dimiliki hampir semua negara. Negara yang paling banyak memiliki fasilitas daur bahan bakar nuklir untuk skala komersial adalah Amerika Serikat sebanyak 157 unit (sekitar 27,07%) dari total 580 unit di dunia. Di Asia, negara yang paling banyak memiliki fasilitas bahan bakar nuklir untuk skala komersial adalah Jepang dengan jumlah 21 unit (sekitar 3,62%). Indonesia belum memiliki fasilitas daur bahan bakar nuklir skala komersial. Indonesia hanya memiliki 4 fasilitas daur bahan bakar nuklir (jenis uranium) skala laboratorium.

Kata kunci: bahan bakar nuklir, fasilitas, PLTN, NFCIS, daur

### ABSTRACT

**NUCLEAR FUEL CYCLE FACILITIES.** The nuclear fuel cycle facilities are needed for nuclear fuel manufacturing. The current status of the availability of nuclear fuel facilities is very important not only for meeting the needs of global nuclear power development but also focused on the guarantee of nuclear fuel supplies. The nuclear fuel cycle industries consist of commercial scale, pilot project and laboratories. This paper provides data and information on the data base of the nuclear fuel industries in the world. The purpose of writing a paper is to identify type and number of nuclear fuel cycle facilities owned by countries in the world. The methodology used is to collect data and information about nuclear fuel cycle facilities in the world from the Nuclear Fuel Cycle Information System directory 2012 and then inputted using spreadsheet (excel program) to illustrate the model of the number of nuclear fuel cycle facilities in the world so that it can be compared from each other. The results show that the world's nuclear fuel cycle facilities of various types and scales totaling 715 units. The largest type of nuclear fuel cycle facility is uranium production, 233 (33.58%), which is owned by almost all countries. The country with the most nuclear fuel cycle facilities for commercial scale is the United States of 157 units (about 27.07%) out of a total of 580 units of world nuclear fuel cycle facilities. In Asia, the country with the most nuclear fuel cycle facilities for commercial scale is Japan with a total of 21 units (about 3.62%). Indonesia does not yet have commercial scale nuclear fuel cycle facilities. Indonesia has only 4 nuclear fuel facilities (laboratory-type uranium mining).

Keywords: nuclear fuel, facilities, NPP, NFCIS, cycle

### PENDAHULUAN

Fasilitas daur bahan nuklir merupakan suatu peralatan maupun sistem yang digunakan untuk memproses daur bahan bakar nuklir. Berdasarkan data dari *Integrated Nuclear Fuel Cycle Information System* (INFCIS)– IAEA, fasilitas daur bahan bakar nuklir terdiri dari [1], [2], [3] :

- a. Fasilitas produksi uranium (mulai penambangan sampai produksi uranium)
- b. Fasilitas konversi uranium
- c. Fasilitas pengayaan uranium
- d. Fasilitas fabrikasi bahan bakar uranium
- e. Fasilitas fabrikasi bahan bakar MOX (*Mixed Oxyde*)
- f. Fasilitas penyimpanan bahan bakar bekas (*spent fuel storage*)
- g. Fasilitas reprosesing bahan bakar bekas (*spent fuel reprocessing*)
- h. Fasilitas pembuangan dan kondisioning bahan bakar bekas (*spent fuel conditioning and disposal*)
- i. Fasilitas paduan zirkonium (*zirconium alloy*)
- j. Fasilitas produksi air berat (*heavy water production*)
- k. Fasilitas komponen perakitan bahan bakar (*fuel assembly component*)

Industri yang terkait dengan daur bahan bakar nuklir di dunia terdiri dari beberapa industri/perusahaan besar yang beroperasi baik secara komersial, laboratorium maupun *pilot plant* di beberapa negara. Pengetahuan dan informasi terkini terkait ketersediaan industri bahan bakar nuklir saat ini dan yang akan datang sangat penting untuk jaminan pasokan bahan bakar nuklir yang berkelanjutan terutama bagi negara - negara yang telah memiliki fasilitas nuklir. Indonesia walaupun belum memiliki Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN), namun data dan informasi tersebut juga sangat dibutuhkan untuk mengetahui status industri tersebut.

Daur bahan bakar nuklir merupakan suatu proses yang diperlukan untuk manufaktur bahan bakar nuklir. Daur bahan bakar nuklir tergantung pada tipe reaktor dan tipe bahan bakar yang digunakan. Pada sekitar tahun 1980, Badan Tenaga Atom Internasional IAEA (*International Atomic Energy Agency*) mulai melakukan pengembangan Sistem Informasi Daur Bahan Bakar Nuklir. Tahapan daur bahan bakar nuklir terdiri dari produksi uranium/pemrosesan bijih uranium, konversi, pengkayaan, fabrikasi bahan bakar uranium, Iradiasi/pengoperasian, penyimpanan bahan bakar bekas, reprosesing dan daur ulang bahan bakar bekas, kondisioning bahan bakar bekas, pembuangan bahan bakar bekas, dan aktifitas industri terkait seperti produksi zirkonium *grade* nuklir, tabung paduan zirkonium, dan produksi air berat [2]. Berdasarkan tahapan daur bahan bakar nuklir tersebut, terdapat beberapa industri atau pembangkit yang melakukan proses daur bahan bakar nuklir. Industri pada masing-masing tahapan daur bahan bakar nuklir dapat berskala komersial, *pilot project* maupun skala laboratorium.

Opsi yang paling efektif untuk daur bahan bakar nuklir secara umum dipilih dengan mempertimbangkan aspek politik, ekonomi, dan sosial dari suatu negara. Sejak kejadian kecelakaan nuklir di Fukushima, Jepang lebih banyak menekankan pada daur bahan bakar nuklir *back-end* [2]. Kecelakaan Fukushima telah memberikan dampak yang sangat besar terhadap kegiatan daur bahan bakar nuklir di dunia. Jepang dan negara – negara di Eropa sebagai negara yang banyak memiliki banyak fasilitas nuklir yang sedang beroperasi dengan industri/ fasilitas daur bahan bakar terbanyak, sangat peduli terhadap keselamatan instalasi [4]. Seiring dengan pembangunan pembangkit listrik tenaga nuklir, *Atomic Energy Commission* (AEC) di Amerika Serikat juga mendorong proses olah ulang (reprosesing) bahan bakar bekas, dimulai pada tahun 1956 [5]. Negara - negara yang tidak memiliki fasilitas olah ulang bahan bakar nuklir seperti Swedia, Finlandia, Jerman dan lain-lain telah mengadopsi kebijakan pembuangan langsung (*direct disposal*) [6], [7]. Pembuangan langsung merupakan opsi manajemen limbah yang secara umum dipilih oleh negara yang tidak memiliki fasilitas olah ulang. Di Jepang, pengelolaan bahan bakar bekas mendapat banyak perhatian dan pengurangan limbah radioaktif menjadi semakin penting setelah kecelakaan Fukushima [6].

Kebijakan dasar nuklir di Jepang bertujuan menggunakan sumber daya bahan bakar nuklir seefektif mungkin, untuk memproses ulang bahan bakar bekas dan secara efektif menggunakan plutonium dan uranium dari hasil yang diolah ulang. Operasi komersial dari pembangkit olah ulang Rokkasho di Jepang sudah beroperasi sejak tahun 2012 [8], [9].

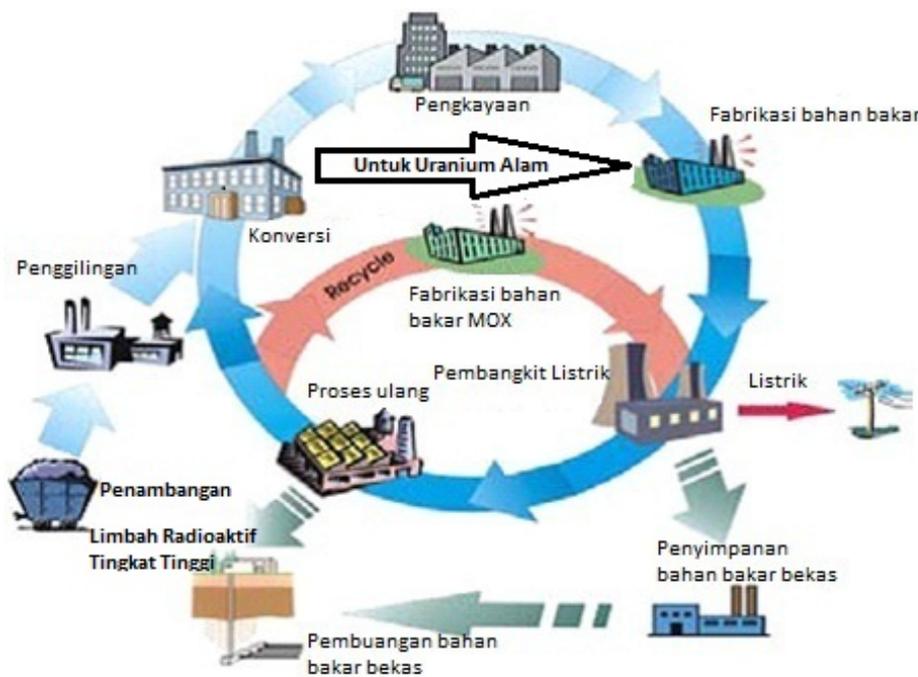
Keuntungan daur bahan bakar tertutup telah ditunjukkan dengan kebijakan daur ulang yang sukses diimplementasikan di Eropa selama lebih dari 30 tahun, dengan 35 reaktor menggunakan bahan bakar MOX. Sejak tanggal 1 Januari 2012, *platform* industri daur ulang AREVA (Pembangkit La Hague dan Melox) telah mengolah lebih lebih dari 27.000 ton bahan bakar bekas dan memproduksi lebih dari 1.850 ton bahan bakar MOX [10]. Pada saat ini setiap negara yang menggunakan energi nuklir telah menginduksikan daur bahan bakar nuklir

yang sesuai dengan negaranya, dan telah menyatakan kepeduliannya terhadap pengelolaan bahan bakar bekas [11].

Makalah ini memberikan data dan informasi mengenai data *base* industri bahan bakar nuklir di dunia. Ruang lingkup pembahasan di makalah ini dibatasi pada data dan informasi industri bahan bakar nuklir dari tiga negara, yaitu Amerika Serikat, Jepang dan Indonesia. Amerika Serikat memiliki fasilitas bahan bakar nuklir terbanyak di dunia, sementara untuk Asia negara yang paling banyak memiliki fasilitas bahan bakar nuklir adalah Jepang. Indonesia dipilih pada makalah ini sebagai perwakilan negara yang akan membangun PLTN. Tujuan studi adalah mengidentifikasi data dan informasi tentang fasilitas daur bahan bakar nuklir di dunia sehingga ketersediaan fasilitas daur bahan bakar dapat menjamin pasokan bahan bakar nuklir yang diperlukan bagi negara yang membutuhkan khususnya Indonesia jika membangun PLTN.

## POKOK BAHASAN

Daur bahan bakar nuklir terdiri dari dua opsi yakni daur bahan bakar terbuka (*open fuel cycle/once - through*) dan Daur bahan bakar tertutup (*closed fuel cycle*). Daur bahan bakar terbuka, material bahan bakar digunakan hanya sekali proses saja, sedangkan Daur bahan bakar tertutup, material bahan bakar yang sudah digunakan/teriradiasi diproses ulang kembali [2]. Pengelolaan dalam membuat bahan bakar nuklir dari bijih uranium sampai fabrikasi bahan bakar nuklir dikenal sebagai daur bahan bakar nuklir *Front End*. Proses *Front - End* terdiri dari penambangan, penggilingan, konversi, pengkayaan dan fabrikasi bahan bakar. Sesudah menghasilkan energi dalam reaktor, bahan bakar nuklir menjadi bahan bakar bekas. Bahan bakar bekas juga diproses dalam fasilitas penyimpanan atau fasilitas proses ulang jika bahan bakar didaur ulang. Penyimpanan sementara, proses ulang, penyimpanan jangka panjang, atau penyimpanan akhir bahan bakar bekas dinamakan daur bahan bakar nuklir *Back - End*. Gambar 1 menunjukkan daur bahan bakar nuklir.



Gambar 1. Daur Bahan Bakar Nuklir [2]

## METODOLOGI

Metodologi yang digunakan adalah mengumpulkan data dan informasi tentang fasilitas Daur bahan bakar nuklir di dunia dari direktori *Nuclear Fuel Cycle Information System* tahun 2012 dan selanjutnya diinput menggunakan *spreadsheet* (program excel) untuk menggambarkan jenis dan jumlah fasilitas daur bahan bakar nuklir di beberapa negara di dunia sehingga dapat dibandingkan dari masing-masing negara.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Fasilitas Daur Bahan Bakar Nuklir di dunia dibagi berdasarkan beberapa jenis fasilitas daur bahan bakar nuklir menurut skala komersial, laboratorium maupun *pilot plant*. Fasilitas daur bahan bakar nuklir di dunia dari berbagai jenis berjumlah 715 unit. Jenis fasilitas daur bahan bakar nuklir terbanyak adalah penambangan uranium yaitu 233 unit (sekitar 33,58% dari total fasilitas bahan bakar nuklir dunia) yang dimiliki hampir oleh semua negara [1]. Jumlah fasilitas daur bahan bakar nuklir terbanyak untuk skala komersial, laboratorium dan *pilot plant* didominasi oleh Amerika Serikat dari semua jenis fasilitas yaitu sebanyak 187 unit. Lima Negara lainnya yang terbanyak memiliki fasilitas bahan bakar nuklir adalah Perancis 48 unit, Inggris 46 unit, Jerman 45 unit, Afrika Selatan dan Kanada masing-masing 40 unit. Amerika Serikat memiliki hampir semua jenis fasilitas bahan bakar nuklir kecuali jenis pembuangan dan kondisioning bahan bakar bekas (*spent fuel conditioning & disposal*), jenis produksi air berat, dan jenis industri perakitan bahan bakar. Fasilitas bahan nuklir terbanyak yang dimiliki Amerika Serikat untuk skala komersial, laboratorium dan *pilot plant* adalah jenis penyimpanan bahan bakar bekas (*spent fuel storage*) sebanyak 66 unit (Gambar 2 terlampir), secara lebih lanjut dijelaskan di bawah [1].

### Amerika Serikat

Seperti dijelaskan di atas bahwa fasilitas daur bahan bakar nuklir untuk skala komersial, laboratorium maupun *pilot plant* di dunia didominasi oleh Amerika Serikat, yaitu sebanyak 187 unit. Secara komersial, Amerika Serikat juga merupakan negara yang memiliki fasilitas daur bahan nuklir terbanyak, yaitu sebanyak 157 unit (sekitar 27,07% dari total 580 unit fasilitas bahan bakar nuklir dunia skala komersial). Fasilitas daur bahan bakar nuklir Amerika terbanyak untuk skala komersial adalah jenis produksi uranium dan penyimpanan bahan bakar bekas (*Spent Fuel Storage*) yaitu sebanyak 59 dan 57 unit. Sisanya adalah dari jenis konversi, pengkayaan dan lain lain. Amerika Serikat memiliki fasilitas bahan bakar nuklir sejak tahun 1944 untuk skala komersial dengan jenis fasilitas *Fuel Fabrication (MOX Assembly)* dan status dekomisioning (tahun 1974). Kapasitas desain fasilitas bahan bakar nuklir terbaru (tahun 2014) yang dimiliki Amerika Serikat untuk skala komersial dengan jenis fasilitas pengayaan uranium, kapasitas desain sebesar 3300 MTSWU/tahun, dan status masih dalam perencanaan [1], [3]. (Gambar 2 Terlampir)

Selain itu Amerika Serikat juga memproduksi bahan nuklir khusus untuk armada nuklir Angkatan Laut AS. Fasilitas daur bahan bakar nuklir Amerika diberi lisensi oleh Komisi Pengaturan Nuklir Amerika Serikat (*Nuclear Regulatory Commission, NRC*) untuk memproses dan menangani bahan nuklir khusus, sumber bahan bakar, atau keduanya. Divisi Keselamatan Siklus Bahan Bakar, Kerangka Pengaman, dan Peninjauan Lingkungan Amerika bertanggung jawab atas pengaturan operasional fasilitas daur bahan bakar secara efektif dan pemberian izin fasilitas baru. Fasilitas daur bahan bakar yang saat ini beroperasi di Amerika terdiri dari tiga kategori [12]:

1. Konversi Uranium
2. Pengayaan Uranium
3. Fabrikasi Bahan Bakar

### Jepang

Di Asia, negara yang paling banyak memiliki fasilitas daur bahan bakar nuklir untuk skala komersial adalah Jepang dengan jumlah total 21 unit (sekitar 3,62% dari total 580 unit fasilitas bahan bakar nuklir dunia), dimana yang masih beroperasi 12 unit, 5 unit *shutdown*, tahap konstruksi, perencanaan, komisioning dan dekomisioning masing-masing 1 unit. Selain untuk skala komersial, Jepang juga memiliki fasilitas bahan bakar nuklir untuk skala laboratorium sebanyak 4 unit dan skala skala *pilot plant* sebanyak 13 unit. Jadi total fasilitas bahan bakar nuklir Jepang sebanyak 38 unit untuk skala komersial, laboratorium dan *pilot plant*. Untuk skala komersial, fasilitas bahan bakar nuklir Jepang sejak tahun 1970 dan masih beroperasi dengan kapasitas desain sebesar 750 t HM/tahun. Pada tahun 1980, Jepang mendirikan perusahaan daur bahan bakar nuklir komersial, *Japan Nuclear Fuel Ltd.* (JNFL), dan memutuskan untuk membangun pabrik proses olah ulang besar di Desa Rokkasho-mura, Kamikita-gun, di samping instalasi percontohan (*pilot plant*) dalam negeri Tokai (kapasitas nominal 90t/tahun) [13]. Pada tanggal 31 Maret 2006, setelah penundaan panjang dan perdebatan kebijakan, pabrik pemrosesan Rokkasho mulai melakukan pengujian aktif. Kapasitas desain fasilitas penyimpanan bahan bakar bekas terletak di Rokkasho-mura,

Kamikita-gun ini merupakan fasilitas bahan bakar nuklir terbesar yang dimiliki Jepang, sebesar 20.400 t HM/tahun [1], [3], [14], [15].

Tabel 1. Fasilitas Bahan Bakar Nuklir Jepang untuk Skala Komersial [1]

Nama Fasilitas	Jenis Fasilitas	Status Fasilitas	Skala	Kapasitas Desain	Mulai Operasi	Akhir Operasi
Cezus- Nagahama	<i>Related Industrial Activities</i>	<i>Shutdown</i>	Komersial	300	1989	1996
Fukushima Daiichi NPP Site SFSF	Penyimpanan bahan bakar bekas	Operasi	Komersial	408	1995	
Fukushima Daiichi NPP Site SFSF	Penyimpanan bahan bakar bekas	Operasi	Komersial	6840	1997	
Global Nuclear Fuel-Japan Co. Ltd. (GNF-J)	Fabrikasi bahan bakar uranium	Operasi	Komersial	750	1970	
Japan Nuclear Fuel Conversion (JCO)	Fabrikasi bahan bakar uranium	<i>Shutdown</i>	Komersial	718	1981	1999
Kobe Special Tube Chofu-Kita	<i>Related Industrial Activities</i>	<i>Shutdown</i>	Komersial	800	1975	2000
Mitsubishi Materials Corporation - Okegawa Plant	<i>Related Industrial Activities</i>	Operasi	Komersial	800	1973	
Mitsubishi Nuclear Fuel Ltd. (MNF)	Fabrikasi bahan bakar uranium	Operasi	Komersial	440	1972	
Mitsubishi Nuclear Fuel Ltd. (MNF)	Fabrikasi bahan bakar uranium	Operasi	Komersial	450	1972	
Nuclear Fuel Industry Ltd. (NFI Kumatori)	Fabrikasi bahan bakar uranium	Operasi	Komersial	284	1972	
Nuclear Fuel Industry Ltd. (NFI Tokai)	Fabrikasi bahan bakar uranium	Operasi	Komersial	200	1980	
Recyclable Fuel Storage Centre	Penyimpanan bahan bakar bekas	Konstruksi	Komersial	5000	2012	
Rokkasho MOX Fuel Fabrication Plant (J-MOX)	Daur dan proses ulang bahan bakar bekas	Perencanaan	Komersial	130	2016	
Rokkasho Reprocessing Plant	Daur dan proses ulang bahan bakar bekas	Komisioning	Komersial	800	2007	
Rokkasho Spent Fuel Storage	Penyimpanan bahan bakar bekas	Operasi	Komersial	20400	1999	
Rokkasho Uranium Enrichment Plant	Pengkayaan	Operasi	Komersial	1050	1992	
SUMITOMO Tube Production Plant	<i>Related Industrial Activities</i>	<i>Shutdown</i>	Komersial	800	1980	2000
Takeyama	Daur dan proses ulang bahan bakar bekas	Dekomisioning	Komersial	10	1972	1973
Tokai II NPP Site SFSF	Penyimpanan bahan bakar bekas	Operasi	Komersial	915	2001	
Zirco Products Amagasaki	<i>Related Industrial Activities</i>	<i>Shutdown</i>	Komersial	800	2000	2003
Zirco Products Chofu-kita	<i>Related Industrial Activities</i>	Operasi	Komersial	1400	2000	

## Indonesia

Berdasarkan *database* dari Sistem Informasi Daur Bahan Bakar Nuklir IAEA, Indonesia memiliki 4 fasilitas bahan bakar nuklir uranium, yang terdiri dari 1 unit untuk skala laboratorium yang beroperasi sejak tahun 1986 dan 3 unit untuk skala *pilot plant* beroperasi sejak tahun 1981. Data tersebut dapat dilihat pada Tabel 2 [1].

Tabel 2. Daftar Fasilitas Bahan Bakar Nuklir di Indonesia [1]

Nama Fasilitas	Jenis Fasilitas	Status Fasilitas	Skala	Kapasitas Desain	Mulai Operasi	Akhir Operasi
Fasilitas elemen bahan bakar eksperimental	Fabrikasi bahan bakar (Reaktor Riset)	Operasi	Laboratorium	0 t HM/year	1986	-
Pemrosesan Lemajung Pilot U	Pemrosesan bijih Uranium	<i>Shutdown</i>	<i>Pilot plant</i>	0.2 t U/year	1981	1996
Instalasi Produksi elemen Bahan Bakar (IFEBRR)	Fabrikasi Bahan Bakar (Reaktor Riset)	Operasi	<i>Pilot plant</i>	0 t HM/year	1986	-
Fasilitas Konversi Serpong	Konversi ke UO <sub>2</sub>	<i>Shutdown</i>	<i>Pilot plant</i>	0.1 t HM/year	-	-

Fasilitas bahan bakar nuklir yang dimiliki Indonesia terdiri dari jenis :

1. Fabrikasi bahan bakar untuk Reaktor Riset dengan skala Laboratorium
2. Pemrosesan Bijih Uranium dengan kapasitas 0,2 tHM/tahun untuk skala *Pilot Plant*
3. Fabrikasi Bahan Bakar untuk Reaktor Riset dengan skala *Pilot Plant*
4. Konversi ke UO<sub>2</sub> (sudah *Shutdown*) dengan kapasitas 0,1 tHM/tahun untuk skala *Pilot Plant* [1].

## KESIMPULAN

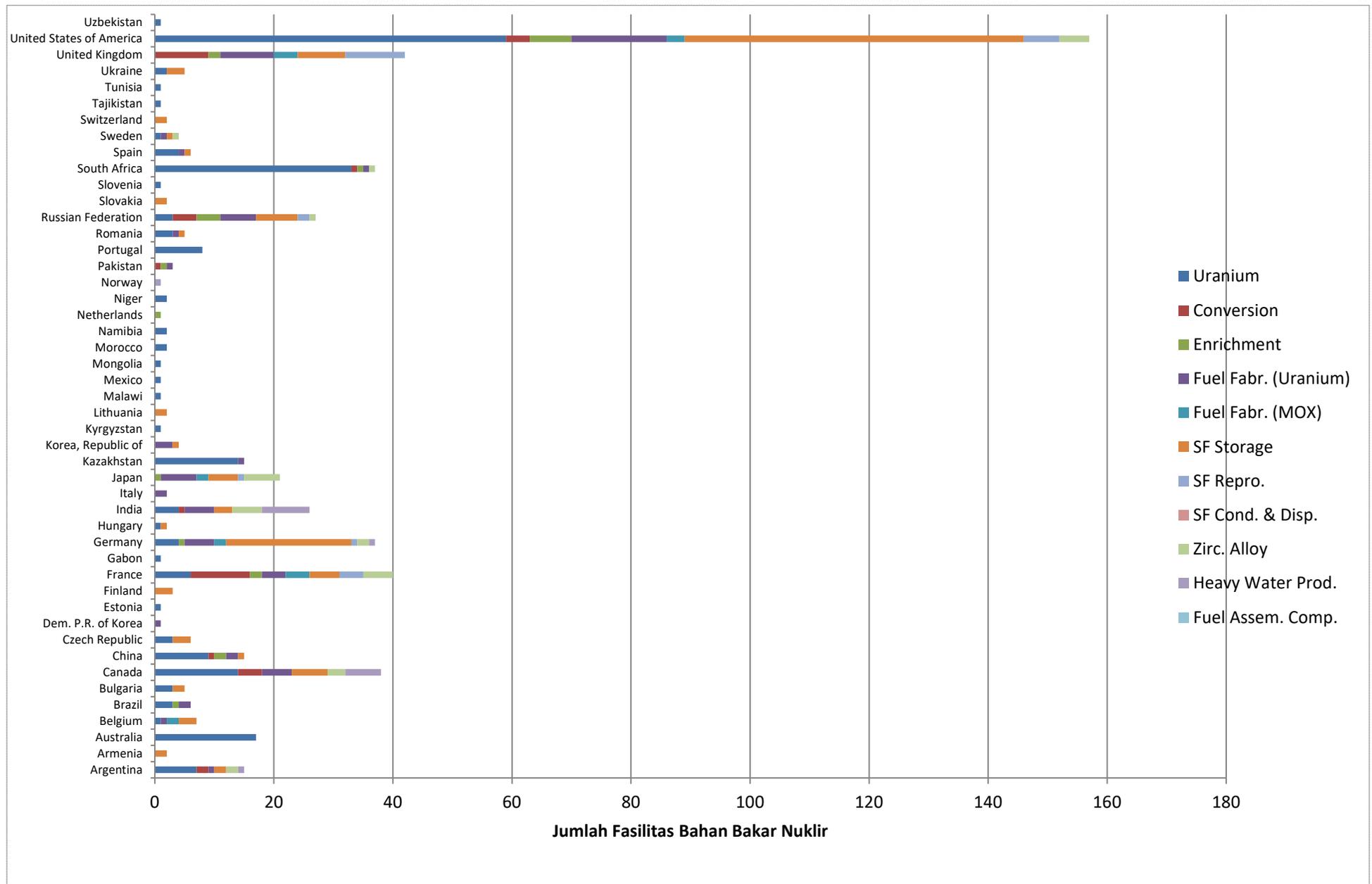
Fasilitas daur bahan bakar nuklir cukup tersedia untuk jaminan daur bahan bakar nuklir. Fasilitas Daur bahan bakar nuklir untuk skala komersial paling banyak didominasi oleh Amerika Serikat yakni sebanyak 157 unit dalam bentuk penambangan uranium murni sebanyak 59 unit, penyimpanan bahan bakar bekas sebanyak 57 unit dan fabrikasi bahan bakar 16 unit, sedangkan sisanya dalam bentuk konversi, pengkayaan dan lain lain. Negara di Asia yang memiliki fasilitas daur bahan bakar nuklir terbesar adalah Jepang, yaitu sebanyak 38 unit yang terdiri dari 21 unit untuk skala komersial, 4 unit skala laboratorium dan 13 unit untuk skala *pilot plant*. Indonesia belum memiliki fasilitas bahan bakar nuklir skala komersial, hanya memiliki fasilitas bahan bakar nuklir untuk skala laboratorium (1 unit) dan skala *pilot plant* (3 unit). Makalah ini masih memerlukan

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih kami sampaikan kepada Bapak Ir. Sriyana, M.T. (sebagai kepala Bidang Kajian Infrastruktur) yang telah memberikan kesempatan untuk membuat makalah seminar SIEN serta pihak KPTF PKSEN yang telah berkenan mereview dan memeriksa makalah ini dengan baik.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] INFCIS, "List of Nuclear Fuel Cycle Facilities," 2012.
- [2] IAEA Tecdoc 1613, "Nuclear Fuel Cycle Information System: A Directory of Nuclear Fuel Cycle Facilities," Vienna, 2009.
- [3] IAEA Technical Report Series No. 425, "Country Nuclear Fuel Cycle Profiles," Vienna, 2005.
- [4] JAMES D. WERNER, "U.S. Spent Nuclear Fuel Storage," in *Congressional Research Service*, May 24 2012.
- [5] SHARON SQUASSONI, "The US Nuclear Industry: Current Status and Prospects under the Obama Administration," in *Canadian Centre for Treaty Compliance Nuclear Energy Futures Paper*, Ottawa, 2009, p. 26.
- [6] P. CARBOL, et. al., "The Nuclear Fuel Cycle Back-end after Fukushima," in *International Conference on Nuclear Chemistry for Sustainable Fuel Cycles*, ATALANTE , 2012, pp. doi: 10.1016/j.proche.2012.10.034 2012.
- [7] MAGDALENA NAZIEMIEC, et. al., "Nuclear Fuel Reprocessing Technological, Social, and Economic Problems," *UChicago Undergraduate Business Journal*, 2016.
- [8] SATORU TANAKA, "Current Status and Future Plan of Nuclear Fuel Cycle in Japan, with Focus on Human Resource Development," in *Asian Nuclear Prospects 2010*, 2010, pp. doi:10.1016/j.egypro.2011.06.012.
- [9] Y. FUJIE, "INNOVATIVE NUCLEAR FUEL CYCLES FOR THE FUTURE:," in *International Conference: Innovative Technologies for Nuclear Fuel Cycles and Nuclear Power*, Vienna, 2003, pp. 29-32.
- [10] JEAN-DOMINIQUE BARBAT, RENAUD LIBERGE, "Nuclear Fuel Cycle: Which strategy to support a sustainable growth for nuclear energy ?," in *Asian Nuclear Prospects 2012*, 2012, pp. doi: 10.1016/j.egypro.2013.07.193.
- [11] IAEA TECDOC 1467, "Status and Trends in Spent Fuel Reprocessing," Vienna, September 2005.
- [12] UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. (2017, September 20) Fuel Cycle Facilities. [Online]. <https://www.nrc.gov/materials/fuel-cycle-fac.html>
- [13] TADAHIRO KATSUTA and TATSUJIRO SUZUKI, "Japan's Civilian Nuclear Fuel Cycle And Nuclear Spent Fuel Management Issue," June 2006.
- [14] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. (2018, August) Japan's Nuclear Fuel Cycle. [Online]. <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/japan-nuclear-fuel-cycle.aspx>
- [15] HIROBUMI KAYAMA. (2014, December) Japan's Current Nuclear Energy Policy. [Online]. <https://vdocuments.mx/japans-current-nuclear-energy-policy-hirobumi-kayama.html>



Gambar 2. Fasilitas Bahan Bakar Nuklir di Dunia [1]

**DISKUSI/TANYA JAWAB :**

**1. PERTANYAAN :**

Berdasarkan Laporan Analisis Keselamatan INIR pada subbab yang terkait dengan instansi lainnya, maka dari ke empat (4) fasilitas daur bahan bakar nuklir yang ada di Indonesia, apakah juga sudah tersedia pada negara lainnya ?

**JAWABAN :**

Empat fasilitas daur bahan bakar nuklir yang ada di Indonesia juga tersedia dan terdapat di negara lain. Adapun negara negara tersebut yang memiliki fasilitas daur bahan bakar nuklir yang sama seperti di Indonesia adalah:

- a. Fabrikasi bahan bakar untuk Reaktor Riset dengan skala Laboratorium contohnya adalah di negara Brazil dan Afrika Selatan.
- b. Pemrosesan Biji Uranium untuk skala Pilot Plant contohnya di negara Pakistan, Serbia, Turki, Portugal, Jepang, dan Cina.
- c. Fabrikasi Bahan Bakar untuk Reaktor Riset dengan skala Pilot Plant contohnya adalah di negara Denmark, Mesir, Italia, Afrika Selatan, dan Brazil.
- d. Konversi ke  $UO_2$  untuk skala Pilot Plant contohnya adalah Turki, Meksiko dan Korea.

# DAFTAR INDEKS PENULIS MAKALAH

---

- Abdul Hafid, 269  
Abdul Waris, 287  
Abimanyu Bondan WS, 113, 237  
Agus Waluyo, 487  
Ajat Sudrajat, 201  
Anis Rohanda, 287  
Arbi Dimiyati, 297  
Arief Tris Yuliyanto, 427, 439, 427, 439  
Arif Isnaeni, 333  
Arif Yuniarto, 93  
Arifin M. Susanto, 359  
Azizul Khakim, 351  
Barokah Aliyanta, 151  
Bening F, 59  
Bintoro Aji, 359  
Catur Febriyanto, 359, 461  
Chrisantus Aristo Wirawan D., 469  
Dedi Hermawan, 131  
Dedy Priambodo, 85  
Denissa B. Syahna, 75, 93  
Dharu Dewi, 415, 439, 513  
Diah Hidayanti Sukarno, 477  
Djoli Soembogo, 309  
Dwi Irwanti, 1  
Edi Slamet R., 47, 507  
Edwaren Liun, 103, 395  
Eko Rudi Iswanto, 269  
Elisabeth Ratnawati, 39, 281  
Eri Hiswara, 21  
Erlan Dewita, 31  
Euis Etty A, 221, 237  
Ewitha Nurulhuda, 371  
Falikul Fikri, 1  
Fd. Dian Indrastomo, 339  
Hadi Suntoko, 201, 209, 237, 243  
Harini Wahyuningrum, 377  
Harry Supriadi, 325  
Hendro W., 59  
Heni Susiati, 93, 209  
Heri Syaeful, 339, 371  
Hermawan Candra, 447  
Hermawan Judawisastra,  
Hermawan Puji Yuwana, 469  
I Gede Sukadana, 339  
I Wayan Ngarayana, 385  
I Wayan Widiana, 47  
Imam Bastori, 103, 395  
Isti Dian Rachmawati, 183  
Jepri Sutanto, 385  
June Mellawati, 141, 193, 243  
Kurnia Anzhar, 243  
Leli Nirwani, 193  
Merri Suhartini, 141  
Moch. Djoko Birmano, 427  
Mudjiono, 201, 455  
Muhammad Awwaluddin, 317  
Muhtadan, 183  
Mujiwiyono, 193  
Ngadenin, 339  
Nita Suhartini, 151  
Nur Siwhan, 131, 173  
Nurhidayat, 183  
Nurlaila, 513  
Oly Desrianti, 377  
Parwanto, 47, 507  
Pertiwi D. W., 59  
Purnomo, 495  
R. Buchari, 193  
Rajiman, 47  
Reno Alamsyah, 487  
Rian Amukti, 229  
Riesna Prassanti, 303  
Rizal Kurniadi, 287  
Rizki Firmansyah SB, 13, 103, 405  
Rohmad Salam, 297  
Rr. Arum Puni Rijanti, 65, 253  
Rr. Djarwanti, RPS, 123  
Rudi Pudjianto, 303  
Rustama, 507  
Sahala Maruli Lumbaraja, 65, 103, 253  
Siti Alimah, 201, 243, 415  
Slamet Suprianto, 287  
Slamet Suryanto, 75, 93, 209  
Sri Hastuty, 317  
Sriyana, 1, 371, 439  
Sufiana Solihat, 113  
Suhaedi Muhammad, 123, 161  
Sumaryo, 297  
Sunarko, 31, 75, 93  
Surian Pinem, 263  
Sutrisno, 39, 281  
Suzie Darmawati, 385  
Tagor Malem Sembiring, 31, 263  
Tri Handini, 325  
Wahyu Rachmi Pusparini, 325  
Wahyudi, 193  
Wiku Lulus Widodo, 13, 405  
Wiryono,  
Wisnu Ari Adi,  
Yaziz Hasan, 455  
Yohanes Edi Gunanto,  
Yuliasuti, 221, 229, 371  
Yuni Indrawati, 229  
Yuri Garini, 377  
Yustantiana, 495



**PUSAT KAJIAN SISTEM ENERGI NUKLIR  
BADAN TENAGA NUKLIR NASIONAL**

