

PROSIDING SEMINAR NASIONAL TEKNOLOGI PENGELOLAAN LIMBAH XIV

TEMA SEMINAR

Pengembangan IPTEK Pengelolaan Limbah yang Inovatif,
Handal, berkelanjutan dan Berwawasan Lingkungan
Guna Meningkatkan Daya Saing Bangsa



05 Oktober 2016

Gedung IASTH Universitas Indonesia
Salemba – Jakarta

Penyelenggara



UNIVERSITAS INDONESIA

Pusat Teknologi Limbah Radioaktif - BATAN
Dan
Program Studi Ilmu Lingkungan - UI

Diterbitkan Desember 2016

KATA PENGANTAR

Puji syukur kita panjatkan ke hadirat Allah SWT, karena atas karunia-Nya Prosiding Seminar Nasional Teknologi Pengelolaan Limbah XIV dapat diterbitkan. Seminar ini terselenggara atas kerjasama antara Pusat Teknologi Limbah Radioaktif - BATAN dengan Program Studi Ilmu Lingkungan – Universitas Indonesia. Seminar dengan tema “Pengembangan IPTEK Pengelolaan Limbah yang Inovatif, Handal, Berkelanjutan dan Berwawasan Lingkungan Guna Meningkatkan Daya Saing Bangsa” telah dilaksanakan pada tanggal 5 Oktober 2016 di Gedung IASTH It.3 Universitas Indonesia, Salemba.

Seminar diselenggarakan sebagai media sosialisasi hasil penelitian dan pengembangan di bidang limbah radioaktif dan non radioaktif. Seminar Nasional Teknologi Pengelolaan Limbah XIV dijadikan sebagai media tukar menukar informasi dan pengalaman, ajang diskusi ilmiah, peningkatan kemitraan di antara peneliti, akademisi, dan praktisi industri, mempertajam visi pembuat kebijakan dan pengambil keputusan, serta peningkatan kesadaran kolektif terhadap pentingnya pengelolaan limbah yang inovatif, handal, berkelanjutan dan berwawasan lingkungan.

Prosiding ini memuat karya tulis dari berbagai hasil penelitian mengenai pengelolaan limbah radioaktif, industri dan lingkungan. Makalah telah melalui proses evaluasi dari tim editor. Makalah dikelompokkan menjadi empat kelompok, yaitu kelompok pengelolaan limbah, disposal, lingkungan, dan perundang-undangan. Makalah-makalah tersebut berasal dari para peneliti di lingkungan BATAN, BAPETEN dan BPPT serta dosen dan mahasiswa di lingkungan UI, UNDIP, dan UNS.

Semoga penerbitan prosiding ini dapat digunakan sebagai data sekunder dalam pengembangan penelitian dimasa akan datang, serta dijadikan bahan acuan dalam kegiatan pengelolaan limbah. Akhir kata kepada semua pihak yang telah membantu, kami ucapkan terima kasih.

Jakarta, Desember 2016

Kepala
Pusat Teknologi Limbah Radioaktif
Badan Tenaga Nuklir Nasional

Ir. Suryantoro, MT

SUSUNAN TIM EDITOR

Ketua	: Dr. Budi Setiawan	- BATAN
Anggota	: 1. Dr. Sigit Santoso	- BATAN
	2. Dr. Heny Suseno	- BATAN
	3. Drs. Gunandjar, SU	- BATAN
	4. Ir. Aisyah, MT	- BATAN
	5. Dr. Djoko Hari Nugroho	- BAPETEN
	6. Dr. Ir. Mohammad Hasroel Thayib, APU	- UI
	7. Dr. Ir. Setyo Sarwanto Moersidik, DEA	- UI

SUSUNAN PANITIA

Pengarah	:	1. Kepala Badan Tenaga Nuklir Nasional	- BATAN
		2. Ketua Program Studi Ilmu Lingkungan UI	- UI
Penanggung Jawab	:	Ir. Suryantoro, MT	- BATAN
Penyelenggara			
Ketua	:	Budiyono, ST	- BATAN
Wakil Ketua	:	Moch. Romli, S.ST, MKKK	- BATAN
Sekretaris	:	1. Enggartati Budhy Hendarti, A.Md	- BATAN
		2. Pricillia Azhani, STP., M.Si.	- UI
		3. Titik Sundari, A.Md	- BATAN
Anggota	:	1. Widya Handayani, SE	- BATAN
		2. Sugianto, ST	- BATAN
		3. Wezia Berkademi, SE, M.Si	- UI
		4. M. Nurhasim, S.ST	- BATAN
		5. Eri Iswayanti, A.Md	- BATAN
		6. Agustinus Muryama, ST	- BATAN
		7. Budi Arisanto, A.Md	- BATAN
		8. Azhar Firdaus, S.Sos.I, M.Si	- UI
		9. Risdiyana, A.Md	- BATAN
		10. Adi Wijayanto, ST	- BATAN
		11. Arifin Istavara, S.ST	- BATAN
		12. CH. Susiana Atmaja, A.Md	- BATAN
		13. Imam Sasmito	- BATAN
		14. Moh. Cecep Cepi H., S.ST	- UI
		15. Parjono, ST	- BATAN
		16. Siswanto	- BATAN
		17. Sariyadi	- BATAN
		18. Maulana	- BAPETEN
		19. Drs. Hendro	- BATAN
		20. Sunardi, ST	- BATAN
		21. Gatot Sumartono, ST	- BATAN
		22. Ir. Eko Madi Parmanto	- BATAN
		23. Alphana Fridia Cessna, ST., M.Si	- UI
		24. Rukiaty	- BATAN
		25. Ade Rustiadam, S.ST	- BATAN
		26. Ajrieh Setiawan, S.ST	- BATAN
		27. Suparno, A.Md	- BATAN
		28. Suhartono, A.Md	- BATAN

DAFTAR ISI

Kata Pengantar	i
Susunan Tim Editor	ii
Susunan Panitia	iii
Daftar Isi	iv
1 Pengembangan Teknologi Pengolahan Limbah Radioaktif Pra-Disposal : Imobilisasi Limbah Radioaktif Uranium Menggunakan Abu Batubara Sebagai Bahan Matriks <i>Synroc</i> .. Gunandjar dan Yuli Purwanto	1
2 Pengelolaan Limbah Cair Dengan Pendekatan Konsep Eko-Efisiensi: Analisis Hubungan Antara Penerapan Program <i>Cleaner Production</i> Di Area Produksi Dengan Kinerja Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL)	14
Wahyu Wikandari, Roekmijati Widaningroem Soemantojo, Tri Edhi Budhi Soesilo	
3 Pengolahan Limbah <i>Methylen Blue</i> Secara Fotokatalisis Dengan TiO ₂ Dimodifikasi Fe Dan Zeolit	29
Agus Salim Afrozi, Rahmat Salam, Auring R, Asep Nana S	
4. Kinerja Konsorsium Bakteri Dari Sungai Opak Yogyakarta Dalam Reduksi Nitrat Dengan Sumber Karbon Yang Berbeda	37
Hanies Ambarsari, Miswanto	
5. Pengelolaan Limbah Radioaktif Hasil Dekontaminasi Di Instalasi Produksi Radioisotop Paska Berhenti Operasi	45
Suhaedi Muhammad, Nazaroh, Rr.Djarwanti,RPS	
6. Pemanfaatan Limbah Oli Bekas Sebagai Bahan Bakar Pembantu Peledakan (ANFO) Pada Kegiatan Pertambangan Batubara (Kasus Pemanfaatan Limbah Oli Bekas di PT. JMB Group)	52
Danang Widiyanto	
7. Sistem Pemurnian Helium Pada Reaktor Daya Experimental (RDE) Tipe HTR-10.....	60
Aisyah, Yuli Purwanto	
8. Pengolahan Limbah Daun Jati Kering Dari Desa Leyangan, Ungaran Menjadi Pulp Kering Dengan Proses Soda	68
Linda Kusumaningrum, Heny Kusumayanti	
9 Pembuatan Zat Warna Alami Dari Buah Mangrove <i>Spesies Rhizophora Stylosa</i> Sebagai Pewarna Batik Ramah Lingkungan Dalam Skala Pilot Plan	76
Paryanto, Wusana Agung Wibowo, Moch Helmy Aditya	
10 Konsentrasi Faktor Pada Bioakumulasi Plutonium Oleh Siput Macan (<i>Babylonia Spirata L.</i>) Di Perairan Teluk Jakarta	82
Murdahayu Makmur , Muhammad Qowi Fikri, Defri Yona, Syarifah Hikmah JS	
11. Pengaruh Koefisien Distribusi ¹³⁷ Cs Pada Keselamatan Calon Tapak Fasilitas Disposasi Limbah Radioaktif	93
Budi Setiawan, Dadang Suganda	
12. Kajian Pengolahan Limbah Radioaktif Cair Menggunakan Beberapa Adsorben	105
Mirawaty, Gustri Nurliati	

13	Studi Eksperimen Difusi Boron Dalam Bentonit Terkompaksi Dalam Kondisi Reduksi Oleh Fe	113
	Mas Udi, Noria Ohkubo	
14	Pengolahan Limbah Uranium Cair Dengan Resin Anion Amberlite IRA-400 Cl Dan Imobilisasi Resin Jenuh Menggunakan Polimer	118
	Dwi Luhur Ibnu Saputra, Wati, Nurhayati	
15	Studi Pemanfaatan Zeolit Sebagai Bahan Penopang Asam Oksalat Untuk Dekontaminasi Permukaan Aluminium	124
	Sutoto	
16	Karakteristik Limbah Radioaktif Tingkat Rendah Dan Sedang Reaktor Daya Eksperimental HTR-10	129
	Kuat Heriyanto	
17	Pengembangan Penerapan Sistem Pengawasan Dalam Rangka Pencegahan Masuknya <i>Scrap Metal</i> Terkontaminasi Zat Radioaktif ke Dalam Wilayah Hukum Republik Indonesia	136
	Nanang Triagung Edi Hermawan	
18	Pengawasan Zirkon Di Indonesia	145
	Moekhamad Alfiyan	
19	Polimorfisme XPD23 Pada Pekerja Radiasi Medik	151
	Wiwin Mailana, dan Yanti Lusiyantri	
20	Pengukuran Radiasi Dan Konsentrasi <i>Naturally Occuring Radioactive Materials</i> (NORM) Pada Lahan Calon Tapak PLTU Batubara Kramatwatu Serang Banten	155
	Sucipta, Risdiana S., Arimuladi SP.	
21	Perhitungan Jumlah Limbah Paska Dekomisioning Reaktor Triga Mark II Bandung	165
	Sutoto, Kuat Heriyanto, Mulyono Daryoko	
22	Fenomena Distribusi Radionuklida Kontaminan Pada Air Kanal Fasilitas KH-IPSB3 Pasca Perbaikan Filter <i>Skimer</i>	173
	Titik Sundari, Darmawan Aji, Arifin	
23	Difusi Radiocesium Oleh Tanah Urugan Sebagai Bahan Penutup Fasilitas Disposal Demo di Kawasan Nuklir Serpong : Karakterisasi <i>Dry Density</i> Tanah Permukaan di Lokasi Fasilitas Disposal Demo	179
	Nurul Efri Ekaningrum, Budi Setiawan	
24	Uji Integritas Kelongsong Bahan Bakar Nuklir Bekas Reaktor Dengan Metode Uji Cicip ..	186
	Dyah Sulistyani Rahayu, Darmawan Aji	
25	Verifikasi Penggunaan Library Origen 2.1 Untuk Perhitungan Inventori Teras Reaktor Tipe HTGR 10 MWth	194
	Anis Rohanda, Jupiter S. Pane, Amir Hamzah	
26	Penentuan Densitas Boron Karbida (B ₄ C) Menggunakan Autopiknometer Dan Secara Metrologi	199
	Torowati, Mu`nisatun, S., Yatno Dwi Agus	
27	Evaluasi Pengukuran Tingkat Kontaminasi Permukaan Material Terkontaminasi Untuk Tujuan Klierens (Studi Kasus : Limbah Pelat Logam Hasil Dekomisioning Fasilitas Pemurnian Fosfat Pt. Petrokimia Gresik)	205
	Moch Romli, Mas'udi , Sugeng Purnomo, M. Nurhasyim, T. Sulistiyo H.N., Suhartono, Imam Sasmito, L. Kwin P	

28	Evaluasi Tahanan Pembumian Instalasi Penyalur Petir Pada Stasiun Meteorologi Kawasan Nuklir Serpong	212
	Adi Wijayanto, Arief Yuniarto, Budihari	
29	Evaluasi Pengendalian Dosis Radiasi Pada Kegiatan <i>Dismantling</i> Dan Pengondisian Zat Radioaktif Terbungkus Yang Tidak Digunakan	217
	Suhartono, Moch Romli, Arie Budianti, Adi Wijayanto, Mahmudin	
30	Penerimaan Dosis Radiasi Sebagai Indikator Keselamatan Dalam Proses Pengolahan Limbah Radioaktif Tahun 2015	224
	L.Kwin Pudjiastuti, Hendro, Suhartono, Arie Budianti	
31	Penerapan Nilai Batas Lepas Radioaktivitas ke Badan Air di Kawasan Nuklir Serpong ..	230
	Arif Yuniarto, Aepah Nurbiyanti, Ambar Winansi, Ritayanti	
32	Analisis Kegagalan Proses Pembangkit Uap Pada Instalasi Pengolahan Limbah Radioaktif Cair	241
	Budiyono, Sugianto	
33	Jaminan Mutu Layanan Evaluasi Dosis Perorangan Dengan <i>TLD Barc</i> di PTKMR-Batan ..	250
	Nazaroh, Rofiq Syaifudin, Sri Subandini Lolaningrum, dan Nina Herlina	
34	Perancangan Sistem Kendali <i>VAC Off-Gas</i> Pada Instalasi Pengolahan Limbah Radioaktif berbasis Programable Logic Control	260
	Sugianto, Budiyono, Arifin Istavara	
35	Uji Kelayakan Operasi Genset BRV20 RSG-Gas Setelah Dilakukan Perbaikan	268
	Teguh Sulisty	
36	Analisis Sistem Ventilasi Fasilitas Produksi 131I di PTRR-BATAN.....	278
	Mulyono, Hermanto, Sofyan Sori, Sriyono	
37	Aplikasi <i>Scada</i> Dengan Media Komunikasi Nirkabel 2.4 Ghz Untuk Pengendali Operasi Fasilitas Kanal Hubung Penyimpanan Sementara Bahan Bakar Nuklir Bekas (KHIPSB3)	283
	Parjono , Budiyono	
38	Pembuatan Dan Pengujian <i>Burner</i> Pada Tungku Peleburan Timbal Untuk Fabrikasi <i>Shielding</i> Sumber Radioaktif Bekas Terbungkus	292
	Arifin Istavara, Jonner Sitompul, Sugianto	
39	Aplikasi Reaktor Pada <i>Capacitor Bank</i> Sebagai Peredam Harmonik Catu Daya Instalasi Pengolahan Limbah Radioaktif	299
	Jonner Sitompul, Sugianto	

PENGEMBANGAN TEKNOLOGI PENGOLAHAN LIMBAH RADIOAKTIF PRA-DISPOSAL : IMOBILISASI LIMBAH RADIOAKTIF URANIUM MENGUNAKAN ABU BATUBARA SEBAGAI BAHAN MATRIKS SYNROC

Gunandjar dan Yuli Purwanto

Pusat Teknologi Limbah Radioaktif-Badan Tenaga Nuklir Nasional
Kawasan Puspiptek Serpong Gedung 50, Tangerang Selatan, Banten 15310
E-mail: gunand-m@batan.go.id

ABSTRAK

PENGEMBANGAN TEKNOLOGI PENGOLAHAN LIMBAH RADIOAKTIF PRA-DISPOSAL : IMOBILISASI LIMBAH RADIOAKTIF URANIUM MENGGUNAKAN ABU BATUBARA SEBAGAI BAHAN MATRIKS SYNROC. Dekomisioning Fasilitas Pemurnian Asam Fosfat-Petrokimia Gresik (FPAF-PKG) menimbulkan limbah cair radioaktif yang mengandung uranium. Limbah tersebut diolah dengan proses bio-oksidasi menggunakan bakteri untuk reduksi volume limbah menjadi limbah *sludge* radioaktif. Limbah *sludge* tersebut harus diimobilisasi melalui proses pemadatan untuk persiapan disposal agar menjamin keselamatan lingkungan hidup dimasa sekarang dan masa depan. Penelitian ini bertujuan untuk imobilisasi limbah *sludge* radioaktif dengan proses pemadatan menggunakan abu terbang batubara sebagai bahan matriks *synroc* titanat. Proses imobilisasi dilakukan dengan mencampur limbah *sludge* radioaktif dengan abu terbang batubara dan prekursor oksida yaitu BaO, CaO, dan TiO₂ sebagai bahan matriks tambahan. Komposisi bahan matriks *synroc* menggunakan abu terbang batubara dan prekursor oksida tambahan (dalam % berat) adalah : Al₂O₃ (6,26); BaO (5,33); CaO (10,52); TiO₂ (68,02) ; dan SiO₂ (6,07). Disamping itu bahan matriks mengandung oksida minor (dalam % berat) adalah : Fe₂O₃ (3,48), MnO₂ (0,04), K₂O (0,20) dan Na₂O (0,08). Tingkat muat limbah dalam blok *synroc* limbah adalah 30 % berat. Campuran kemudian dikeringkan pada suhu 100 °C, dan dikalsinasi pada 750 °C. Serbuk hasil kalsinasi kemudian dipres dalam cetakan. Selanjutnya, proses sintering dilakukan pada suhu 900 – 1300 °C selama 1-4 jam sampai membentuk blok *synroc* keramik multifase padat. Kualitas blok *synroc* hasil imobilisasi ditentukan dengan pengujian densitas, kuat tekan dan laju pelindihan uranium (laju pelindihan dipercepat pada suhu air 100 °C). Hasil pengujian menunjukkan bahwa kualitas terbaik blok *synroc* limbah diperoleh pada tingkat muat limbah 30 % berat, suhu sintering 1100 °C selama 3,5 jam dengan harga densitas 2,29 g/cm³, kuat tekan 6,97 kN/cm², dan laju pelindihan uranium 3,16x10⁻⁶ g.cm⁻².hari⁻¹. Kualitas blok *synroc* limbah yang dihasilkan dari dengan proses sintering telah memenuhi rekomendasi IAEA.

Kata Kunci : abu terbang batubara, imobilisasi limbah, limbah uranium, *synroc*.

ABSTRACT

TECHNOLOGY DEVELOPMENT OF INDUSTRIAL LIQUID RADIOACTIVE WASTE TREATMENT : THE IMMOBILIZATION OF URANIUM RADIOACTIVE WASTE USING COAL-ASH AS MATRIX MATERIAL OF SYNROC. The decommissioning of Phosphoric Acid Purification Facility – Petro Chemical of Gresik (PAPF-PCG) generates radioactive liquid waste containing uranium. The waste was treated by bio-oxidation process using bacteria for volume reduction of the waste to become radioactive sludge waste. The sludge waste must be immobilized by solidification process for preparation of disposal to ensure the safety of the environment in the present and future. This research aim to immobilization of the radioactive sludge waste by solidification using coal-ash as matrix material of titanate *synroc*. Immobilization process was carried-out by mix the radioactive sludge waste with coal-ash and precursor oxides namely BaO, CaO, and TiO₂ as addition of matrix materials. The composition of matrix material of *synroc* using coal-ash and addition of precursor oxides (in weight %) i.e : Al₂O₃ (6.26); BaO (5.33); CaO (10.52); TiO₂ (68.02) ; and SiO₂ (6.07). Beside that the matrix material contains oxides minor (in weight %) i.e : Fe₂O₃ (3.48), MnO₂ (0.04), K₂O (0.20) and Na₂O (0.08). Waste loading in the waste *synroc* block was 30 weight %. The mixture then was dried at temperature of 130 °C, and calcined at 750 °C. The powder of calcination result then was pressed in the molder. Furthermore, the sintering process was carried out at the temperature of 900 – 1300 °C for 1-4hours to form the solid multiphase ceramic of *synroc* block. The quality of the *synroc* block produced from immobilization was determined by testing of density, compressive strength, and leach-rateof uranium (the accelerated leach-rate at temperature of water 100 °C). The test results showed that the best quality of waste *synroc* block was obtained at the waste loading 30 % wt, sintering temperature of 1100 °C for 3.5 hours with values of density 2.29 g/cm³, compressive strength 6.97 kN/cm², and leach-rate of uranium is 3.16x10⁻⁶ g.cm⁻².day⁻¹. The quality of the waste *synroc* block produced by sintering process has fulfill the recommendation of IAEA.

Keywords: coal fly-ash, immobilization of waste, uranium waste, *synroc*.

PENDAHULUAN

Fasilitas Pemurnian Asam Fosfat-Petrokimia Gresik (PAF-PKG) dihentikan operasinya sejak 12 Agustus 1989, selanjutnya dilakukan dekomisioning dengan izin dari BAPETEN (Badan Pengawas Tenaga Nuklir) yang tertuang dalam Surat Izin Dekomisioning No. 286/ID/DPI/14-X/2004 tanggal 14 Oktober 2004 yang berlaku selama 5 tahun sampai dengan 13 Oktober 2009 [1]. Kegiatan dekomisioning fasilitas PAF-PKG tersebut menimbulkan limbah radioaktif cair organik yang mengandung uranium, campuran pelarut (solven) D2EHPA [*di(2-ethyl hexyl phosphoric acid)*] ($C_{16}H_{35}O_4PO$), TOPO (*trioctylphosphine oxide*) ($C_{24}H_{51}OP$), dan kerosen (pada rasio 4:1:16) serta air (rasio pelarut terhadap air 1:3), yang mempunyai volume 371 m^3 , pH 3,48, *Chemical Oxygen Demand* (COD) 31.500 ppm, dan *Biological Oxygen Demand* (BOD) 2.200 ppm, serta aktivitas alfa (α) dan beta (β) berturut-turut 1200 dan 2600 Bq/liter, ditampung dalam bak penampung berukuran $14 \times 15 \times 3\text{ m}^3$ di lokasi fasilitas PAF-PKG. Limbah tersebut merupakan limbah bahan berbahaya dan beracun (B3) yang radioaktif, mengandung radionuklida uranium alam (U-238) dan 14 anak luruhnya yaitu U-234, Th-234, Th-230, Pa-234, Ra-226, Rn-222, Po-218, Po-214, Po-210, Bi-214, Bi-210, Pb-214, Pb-210, dan Pb-206 [2]. Uranium dan beberapa anak luruhnya merupakan radionuklida pemancar alfa sebagaimana sifat partikel alfa yang mempunyai daya rusak besar maka jika masuk ke dalam tubuh akan menimbulkan kerusakan pada jaringan biologis. Disamping mempunyai daya rusak terhadap jaringan biologis, uranium dan anak luruhnya mempunyai sifat radiotoksitas yang sangat tinggi. Guna menghindari resiko pencemaran lingkungan, limbah tersebut telah diolah dengan proses biooksidasi (oksidasi biokimia) untuk menurunkan nilai COD, BOD dan pH serta radioaktivitasnya menjadi nilai yang memenuhi baku mutu limbah cair industri pada nilai COD ≤ 100 ppm, BOD ≤ 50 ppm, dan pH 5-9 [3], serta baku mutu tingkat radioaktivitas di lingkungan untuk uranium dalam air sebesar 1000 Bq/liter [4].

Proses biooksidasi dilakukan setelah penetralan larutan dengan NaOH, pengolahan limbah dengan proses biooksidasi diperoleh *sludge* (lumpur) radioaktif. Hasil *sludge* merupakan limbah radioaktif beraktivitas alfa pada harga 0,4 - 40,2 Bq/liter, dan beta pada nilai 1173 - 4100 Bq/liter, kadar padatan total 40-50 % berat [1]. Limbah *sludge* radioaktif tersebut harus diisolasi guna melindungi masyarakat dan lingkungan dari dampak radiasi yang berbahaya. Isolasi limbah radioaktif dilakukan dengan cara imobilisasi melalui proses solidifikasi (pemadatan) limbah dengan suatu bahan matriks,

sehingga diperoleh blok hasil solidifikasi dimana limbah radioaktifnya terkungkung dan terisolasi di dalamnya. Bahan matriks yang biasa digunakan dalam proses solidifikasi limbah radioaktif antara lain semen, aspal (bitumen), plastik polimer, dan gelas. Pengembangan terakhir telah digunakan bahan matriks *synroc*.

Limbah *sludge* radioaktif dari dekomisioning fasilitas PAF-PKG mengandung uranium dan anak luruhnya termasuk dalam kriteria limbah pemancar alfa berumur panjang aktivitas rendah atau sedang. Limbah ini dapat disolidifikasi menggunakan bahan matriks plastik polimer atau aspal. Pengembangan terakhir telah digunakan bahan matriks *synroc*. *Synroc* adalah bentuk kristalin padat yang tersusun dari gabungan fase-fase titanat yang stabil dan dipilih karena kestabilan geokimia dan kemampuan kolektif untuk imobilisasi semua unsur radioaktif hasil belah dan aktinida umur panjang dalam limbah radioaktif.

Metode pembentukan *synroc* dengan proses pres-panas pada suhu tinggi telah dikembangkan di beberapa negara seperti Australia, Amerika Serikat, Inggris dan Jepang. Pada penelitian ini, karena tidak tersedianya alat pres-panas, maka dilakukan imobilisasi limbah radioaktif yang mengandung uranium menggunakan limbah Abu Terbang Batubara (ATB) sebagai bahan matriks *Synroc Supercalcine Silico-Titanat* dengan proses sintering pada suhu tinggi. Kualitas blok *synroc* limbah dan kondisi proses imobilisasi yang terbaik ditentukan dengan pengujian karakteristik blok *synroc* limbah yang meliputi densitas, kuat tekan, dan laju pelindihan uranium (pelindihan dipercepat dalam media air pada suhu $100\text{ }^\circ\text{C}$).

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan teknologi proses imobilisasi limbah *sludge* yang mengandung uranium yang ditimbulkan dari dekomisioning fasilitas PAF-PKG dengan memanfaatkan limbah Abu Terbang Batubara (ATB) sebagai bahan matriks *Synroc Supercalcine Silico-Titanate* dengan proses sintering suhu tinggi yang merupakan pengembangan dari proses pres-panas isostatik. Penelitian ini juga sebagai upaya untuk mendapatkan teknologi proses imobilisasi limbah radioaktif yang mengandung uranium yang ditimbulkan dari proses penyediaan bahan bakar nuklir baik melalui jalur penambangan maupun dari proses pemurnian asam fosfat, sehingga dapat mendukung program PLTN yang akan datang di Indonesia.

DASAR TEORI

a. Imobilisasi dengan bahan matriks *Synroc Supercalcine Zirconio-Titanate*

Pengembangan bahan matriks *synroc* pertama kali dikemukakan sebagai alternatif pengganti gelas borosilikat untuk imobilisasi limbah cair radioaktif tingkat tinggi (LCRTT), dengan ide dasar memasukkan limbah hasil belah dan aktinida ke dalam kisi-kisi kristal mineral sintesis yang telah diketahui mempunyai umur yang sangat panjang (beberapa juta tahun) di alam. Sebagai ilustrasi ditemukan *chemical zoning* dari mineral *zirconite* alam dalam umur 40 juta tahun yang ditemukan di Adamello Itali Utara, kristal tersebut mengandung : 2,7 – 17,1 % berat ThO_2 dan 0,7 – 6,0 % berat UO_2 dan telah dihitung dosis peluruhan α adalah 0,2 – 1,0 $\times 10^{16}$ α /mg yang ekuivalen dengan umur suatu *synroc* yang disimpan selama 10^5 - 10^6 tahun. Mineral-mineral yang dipilih terutama adalah mineral silikat (*pollucite* $\text{CsAlSi}_2\text{O}_6$, Strosium *feldspar* $\text{SrAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), fosfat (monasit, CePO_4 , *apatite* $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$) dan oksida (*fluorite-structured* UO_2) dan campuran fase-fase tersebut yang dibentuk melalui proses sintering pada suhu sekitar 1100 °C setelah alumina, fosfat, dan silika ditambahkan pada limbah hasil fisi. Tingkat muat limbah dalam *Supercalcines* ini bisa mencapai 70 wt% [5].

Ringwood (1978) menemukan *synroc* titanat yang merupakan gabungan mineral titanat yang jauh lebih tahan terhadap air dibanding dengan sederetan mineral-mineral *supercalcine*

[6]. Proses pembentukan *synroc* dilakukan melalui pencampuran LCRTT dengan bahan prekursor oksida sehingga menjadi *slurry*, dilanjutkan dengan pengeringan *slurry* pada suhu 130 °C (sehingga menjadi serbuk), dikalsinasi pada suhu 750 °C dengan media Ar-44% H_2 , kemudian dituang ke dalam baja tahan karat dan dilakukan proses pres-panas pada suhu 1150-1200 °C dan tekanan 500-1000 bar sehingga terbentuk keramik monolit *synroc* multi fase yang sangat padat dan kompak [6]. Komposisi prekursor oksida untuk *Synroc Supercalcine Zirconio-Titanate* (dalam % berat) adalah : Al_2O_3 (5,4); BaO (5,6); CaO (11,0); TiO_2 (71,4) dan ZrO_2 (6,6). Fase-fase mineral utama dalam *synroc* adalah: *Hollandite* [$\text{Ba}(\text{AlTi})_2\text{Ti}_6\text{O}_{16}$], *Zirconolite* ($\text{CaZrTi}_2\text{O}_7$), dan *Perovskite* (CaTiO_3), selain itu terdapat fase titan-oksida dan fase paduan dalam jumlah lebih kecil. Pembentukan fase-fase utama mineral *synroc* tersebut terjadi pada suhu tinggi sekitar 1150 - 1200 °C. Sebagaimana tujuan awal pengembangan *synroc*, maka telah dikembangkan *synroc-C* yaitu jenis *Synroc Supercalcine Zirconio-Titanate* yang dikembangkan untuk imobilisasi LCRTT yang ditimbulkan dari proses olah-ulang bahan bakar nuklir bekas. Fase-fase penyusun *synroc -C* (sebagai *synroc* standar) dan radionuklida yang masuk ke dalam kisi-kisi berbagai fase mineral yang ada ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi dan mineralogi *synroc* standar (*synroc-C* atau *Synroc Supercalcine Zirconio-Titanate*) yang mengandung 20 % berat limbah radioaktif tingkat tinggi [5,6].

Fase mineral	% berat	Radionuklida dalam kisi fase mineral
a. Fase Utama :		
<i>Hollandite</i> , $\text{Ba}(\text{Al,Ti})_2\text{Ti}_6\text{O}_{16}$	30	- Cs dan Rb.
<i>Zirconolite</i> , $\text{CaZrTi}_2\text{O}_7$	30	- Logam tanah jarang (<i>RE</i>), aktinida (<i>An</i>).
<i>Perovskite</i> , CaTiO_3	20	- Sr, logam tanah Jarang, dan aktinida.
b. Fase Minor :		
Titan Oksida	10	
Fase paduan (<i>Alloy phases</i>)	5	- Tc, Pd, Rh, Ru, dll.
Fase oksida lain	5	

Pada pengembangan *Synroc Supercalcine Zirconio-Titanate* terbentuk fase turunan dari fase utama dengan unsur-unsur yang terkandung dalam limbah, yaitu : *pyrochlore* (CaATi_2O_7 , A = Gd, Hf, Pu, dan U) yang merupakan turunan *zirconolite* dengan penambahan unsur penyerap

neutron (Hf dan Gd) untuk mencegah terjadinya kritikalitas, *brannerite* (AnTi_2O_6 , An = aktinida), dan *freudenbergite* ($\text{Na}_2\text{Fe}_2\text{Ti}_6\text{O}_{16}$). Fase-fase turunan mineral *synroc* titanat dan radionuklida penyusunnya ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Fase-fase turunan dalam mineral *synroc* standar (*Synroc Supercalcine Zirconio-Titanate*) dan Radionuklida yang menjadi penyusun fase mineral [6].

Fase Turunan	Rumus Kimia	Radionuklida Penyusun Fase Turunan
<i>Pyrochlore</i> ^{a)} <i>Brannerite</i> ^{b)} <i>Freudenbergite</i> ^{c)}	CaATi_2O_7 $\text{An Ti}_2\text{O}_6$ $\text{Na}_2\text{Fe}_2\text{Ti}_6\text{O}_{16}$	- Ca dan A (Gd, Hf, Pu, U) - Aktinida (An) - Na, Fe
<p>^{a)} Turunan <i>zirconolite</i> dengan penggantian Zr oleh A (Gd, Hf, Pu, U). ^{b)} Turunan <i>perovskite</i> dengan penggantian Ca oleh An (Aktinida). ^{c)} Turunan <i>hollandite</i> dengan penggantian Ba, (Al,Ti) oleh Na dan Fe.</p>		

Hasil pengujian karakteristik blok *synroc* limbah yang dilakukan oleh ANSTO (Australia) yang menggunakan proses pres-panas isostatik pada suhu 1200 °C memberikan densitas antara 2,1-3,4 g/cm³, yaitu tergantung jenis limbah (kandungan radionuklida) dan tingkat muat limbah (*waste loading*) [7]. *Synroc Supercalcine Zirconio-Titanate* mampu mengungkung lebih kuat untuk unsur radioaktif dengan nomor massa yang lebih tinggi (seperti uranium) dibanding dengan unsur-unsur ringan. Laju pelindihan dipercepat (suhu air 100 °C) untuk uranium pada hari pertama sekitar 5,0 x 10⁻⁴ g.cm⁻².hari⁻¹, kemudian dengan cepat turun dalam beberapa hari (10-30 hari) pertama dan secara *asymptotic* turun menuju suatu harga minimum sekitar 5,0 x 10⁻⁶ g.cm⁻².hari⁻¹ [8]. Kemampuan *synroc* titanat untuk imobilisasi unsur-unsur berat radioaktif (unsur-unsur aktinida termasuk uranium) adalah lebih kuat daripada unsur-unsur radioaktif yang lebih ringan. Berdasar kemampuan tersebut maka pada perkembangan terakhir *Synroc Supercalcine Zirconio-Titanate* sangat baik digunakan untuk imobilisasi limbah yang mengandung unsur-unsur radioaktif pemancar alfa umur panjang (unsur-unsur aktinida termasuk uranium). Berdasar Tabel 1 dan Tabel 2, uranium dan unsur aktinida lainnya yang terkandung dalam limbah akan terperangkap dalam fase *zirconolite*, *perovskite*, *pyrochlore* dan *brannerite* [6, 8, 9].

b. Pemanfaatan limbah abu terbang batubara sebagai bahan matriks *synroc*

Komposisi limbah abu terbang batubara (ATB) yang digunakan sebagai bahan matriks *synroc* ditunjukkan pada Tabel 3. Berdasar

komposisi limbah ATB tersebut, menunjukkan adanya oksida mayor dalam limbah ATB yaitu SiO₂, Al₂O₃, dan Fe₂O₃. Selain itu terdapat oksida minor yaitu CaO, TiO₂, MnO₂, K₂O, dan Na₂O. Kandungan unsur atau oksida lain yang kadarnya sangat rendah (sebagai pengotor) yang kadarnya dalam orde ppm (part per million) adalah Ba, Cr, Hg, Ni, Sr, Cu, Pb, V, dan Zn (tidak dicantumkan dalam Tabel 3). Dengan mengacu pada komposisi matriks *synroc* standar, seperti yang telah dikemukakan di atas, maka kandungan SiO₂ dan Al₂O₃ cukup tinggi sebagai matriks utama. Kandungan SiO₂ dapat berperan sebagai pengganti ZrO₂ untuk membentuk *Synroc Supercalcine Silico-Titanate*, sedang untuk membentuk *Synroc-Titanate* perlu penambahan TiO₂ sebagai matriks utama. Prekursor oksida lain yang perlu ditambahkan untuk menyesuaikan komposisi matriks *synroc* standar adalah BaO dan CaO.

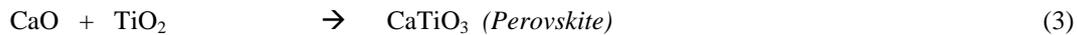
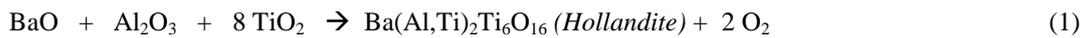
Pada penelitian ini akan dikembangkan dengan matriks *Synroc Supercalcine Silico-Titanate*, matriks ini tidak menggunakan zirkonium oksida (ZrO₂) sebagai salah satu komponen prekursor dan diganti dengan SiO₂ yang telah ada terkandung di dalam bahan matriks ATB, sehingga diharapkan lebih murah. Dengan penambahan prekursor oksida tambahan yaitu BaO, CaO dan TiO₂ ke dalam bahan matriks ATB maka komposisi prekursor oksida yang akan dicoba disesuaikan dengan komposisi *synroc* standar (dalam % berat) ditunjukkan pada Tabel 2. Komposisi prekursor oksida utama pembentuk *Synroc Supercalcine Silico-Titanate* adalah : Al₂O₃, BaO, CaO, TiO₂ dan SiO₂.

Tabel 3. Komposisi limbah Abu Terbang Batubara (*Coal Fly-Ash*) [10].

No	Kandungan Oksida	Konsentrasi Dalam Abu Terbang Batubara (ATB) (%)
1	SiO ₂	35,44
2	Al ₂ O ₃	36,54
3	CaO	5,26
4	BaO	-
5	TiO ₂	0,66
6	Fe ₂ O ₃	20,32
7	MnO ₂	0,20
8	K ₂ O	1,15
9	Na ₂ O	0,43

Beberapa pembentukan fase-fase utama mineral *Synroc Supercalcine Silico-Titanate* yang

diperkirakan terjadi pada suhu tinggi sekitar 900-1300 °C dengan reaksi sebagai berikut [5] :



Fase-fase turunan dari *siliconolite* dan dari *perovskite* yang akan terbentuk diperkirakan yaitu antara lain AnTi₂O₆ (An = aktinida), CaATi₂O₇ (A=Pu, U, Gd, Hf), dan Na₂Fe₂Ti₆O₁₆. Selain itu terbentuk pula fase-fase baru karena

adanya SiO₂, fase-fase baru tersebut antara lain adalah *UO₂-Pollucite* : [(UO₂)(AlSi₂O₆)₂] dan *UO₂-Feldspar* [(UO₂)Al₂Si₂O₈], melalui reaksi [5] :



Radionuklida dalam limbah akan terperangkap dalam kisi-kisi fase mineral dan bahkan ada beberapa sebagai penyusun fase sebagai fase turunan. Adanya fase-fase tersebut perlu diidentifikasi dengan analisis mikrostruktur. Teknologi pembentukan blok *synroc* limbah yang telah dikembangkan di Australia, Amerika Serikat, Inggris, dan Jepang adalah dengan pres-panas isostatik atau *hot isostatic pressing* (HIP) [5]. Proses HIP ini memerlukan alat pres-panas suhu tinggi. Salah satu alternatif proses lain adalah melalui proses sintering suhu tinggi tanpa pres-panas dan proses ini telah dipelajari di *Lawrence Livermore National Laboratory* [11]. Pada penelitian ini dipelajari imobilisasi limbah *sludge* yang

mengandung uranium dengan matriks *Synroc Supercalcine Silico-Titanate* menggunakan Abu Terbang Batubara (ATB), melalui proses pendingin dilanjutkan sintering pada suhu tinggi (900-1300 °C, selama 3 jam). Kualitas hasil imobilisasi ditentukan dengan melakukan uji karakteristik yang meliputi uji densitas, uji kuat tekan, dan laju pelindihan uranium dipercepat dalam medium air pada suhu 100 °C.

METODOLOGI

a. Bahan

Bahan yang digunakan : prekursor oksida Al₂O₃, BaO, CaO, ZrO₂, TiO₂, abu terbang batubara (ATB), dan uranil nitrat heksahidrat

(UNH), aquades atau air bebas mineral, bahan kimia pendukung HNO_3 , NaOH , Arsenazo-III (semua bahan kimia buatan E.Merk dengan kualitas p.a), dan limbah *sludge* yang mengandung uranium yang ditimbulkan dari dekomisioning fasilitas Pemurnian Asam Fosfat – Petrokimia Gresik (PAF-PKG).

b. Peralatan

Alat yang digunakan adalah : Kompor listrik (*Hot Plate*), alat cetak blok limbah, alat rolling *Gardco LabMill 8000*, jangka sorong *Krisbow Digital*, oven *Labtech LDO-080F Iwaki*, tungku pemanas *Furnace Vulcan A-550 1500 °C*, alat uji tekan *Carver Hydraulic Unit model #3012*, alat uji laju pelindihan (*soxhlet*), Spektrofotometer UV-VIS *Lambda 35 Perkin Elmer*, timbangan elektrik, dan alat-alat gelas laboratorium.

c. Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Bidang Teknologi Pengolahan dan Penyimpanan Limbah, Pusat Teknologi Limbah Radioaktif, Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) pada tahun 2015.

d. Tata Kerja

1) Penyiapan limbah

Sejumlah 200 ml limbah *sludge* yang mengandung uranium (dari dekomisioning fasilitas PAF-PKG) dikeringkan dan sehingga diperoleh serbuk limbah padat kurang lebih sebanyak 100 g. Berdasarkan hasil analisis dengan metode Voltameteri diperoleh kandungan uranium dalam limbah *sludge* sebesar 25.977 ppm (setara dengan $2,85 \times 10^5$ Bq/liter atau sama dengan $7,71 \times 10^{-3}$ Ci/m³ sehingga termasuk limbah aktivitas rendah), sedang hasil analisis kandungan uranium dalam serbuk hasil pengabuan limbah *sludge* adalah 59.080 ± 209 ppm

2) Imobilisasi limbah menggunakan abu terbang batubara (ATB) sebagai matriks *synroc*

Penyiapan matriks *synroc* menggunakan abu terbang batubara (ATB) dilakukan dengan mencampur (dalam % berat) : abu terbang batubara (18); CaO (10,1) ; BaO (5,6) ; dan TiO₂

(71,3), dalam gelas piala, ditutup dan diaduk menggunakan alat *rolling* selama 30 menit. Selanjutnya dilakukan proses imobilisasi limbah dengan mencampur bahan matriks dan limbah. Untuk tingkat muat limbah 30 % berat, maka perbandingan berat limbah dan bahan matriks adalah 3:7. Campuran tersebut diaduk hingga homogen, kemudian dikeringkan pada suhu 100 °C dan dikalsinasi dalam *furnace* pada suhu 750 °C selama 30 menit. Serbuk hasil kalsinasi lalu dicetak dan dipres dalam cetakan berbentuk pipa baja tahan karat, hasil cetakan dilepas dari cetakan kemudian dilakukan proses sintering dengan variasi suhu 900 -1300 °C, dan variasi waktu selama 1-4 jam (untuk beberapa sampel hasil cetakan). Masing-masing blok *synroc* limbah hasil proses imobilisasi dilakukan pengujian densitas, kuat tekan, dan laju pelindihan uranium, kemudian berdasar hasil pengujian diperoleh suhu dan waktu sintering yang optimum untuk mendapatkan kualitas blok *synroc* limbah yang terbaik.

3) Pengujian blok *synroc* limbah

Pengujian densitas blok *synroc* limbah dilakukan dengan menentukan berat (dengan penimbangan) dan volume (dengan mengukur tinggi dan diameter) sampel blok limbah. Pengujian kuat tekan dilakukan dengan alat uji tekan.

Pengujian laju pelindihan blok limbah dilakukan menurut *Japan Industrial Standard (JIS)*, yaitu laju pelindihan dipercepat dalam medium air 100 °C [12]. Metode penentuan laju pelindihan ini sama seperti metode standar pengujian laju pelindihan yang ditetapkan oleh IAEA [13,14]. Blok limbah dimasukkan dalam basket dan dipasang pada alat *soxhlet* untuk direfluks dengan air bebas mineral (air murni) pada suhu 100 °C dan tekanan 1 atmosfer selama 6 jam. Laju pelindihan ini setara dengan laju pelindihan pada suhu 25 °C selama 100 tahun. Selanjutnya konsentrasi uranium dalam air pelindih ditentukan dengan metode Spektrofotometri UV-VIS menggunakan pereaksi Arsenazo-III untuk mengetahui jumlah uranium yang terlindih. Laju pelindihan uranium dalam blok *synroc* limbah dihitung dengan persamaan [12,13,14] :

$$L = \frac{W_o - W_t}{A.t} \quad (7)$$

L adalah laju pelindihan ($\text{g.cm}^{-2}.\text{hari}^{-1}$), W_o = berat unsur dalam sampel mula-mula (g), W_t = berat unsur dalam sampel setelah dilindih selama t hari (g), A = luas permukaan sampel (cm^2), dan t = waktu pelindihan (hari). Untuk laju pelindihan uranium, $W_o - W_t$ = jumlah uranium yang terlindih dalam air pelindih selama waktu pelindihan (g).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Komposisi blok *synroc* standar adalah mengandung bahan prekursor oksida yang terdiri (dalam % berat) : Al_2O_3 (5,4), BaO (5,6); CaO (11,0) ; TiO_2 (71,4) ; dan ZrO_2 (6,6) [6]. Sedangkan untuk matriks *synroc* menggunakan abu terbang batubara (ATB) dilakukan dengan mencampur (dalam % berat) : ATB (18,0); CaO (10,1) ; BaO (5,6) ; dan TiO_2 (71,3). Perbandingan komposisi kedua jenis blok *synroc* limbah tersebut ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Perbandingan komposisi bahan matriks blok *synroc* titanat standar dan blok *synroc* titanat menggunakan abu terbang batubara (ATB) [6,10].

Oksida	Komposisi Oksida	
	Dalam Matriks <i>Synroc</i> Titanat (Standar) (%)	Dalam Matriks <i>Synroc</i> (Menggunakan Abu Terbang Batubara) *) (%)
SiO_2	-	6,07
Al_2O_3	5,4	6,26
CaO	11,0	10,52
BaO	5,6	5,33
TiO_2	71,4	68,02
ZrO_2	6,6	-
Fe_2O_3	-	3,48
MnO_2	-	0,04
K_2O	-	0,20
Na_2O	-	0,08
Jumlah	100,00	100,00
*) Komposisi (dalam % berat) : ATB (17,2) ; CaO (9,6) ; BaO (5,3); dan TiO_2 (67,9).		

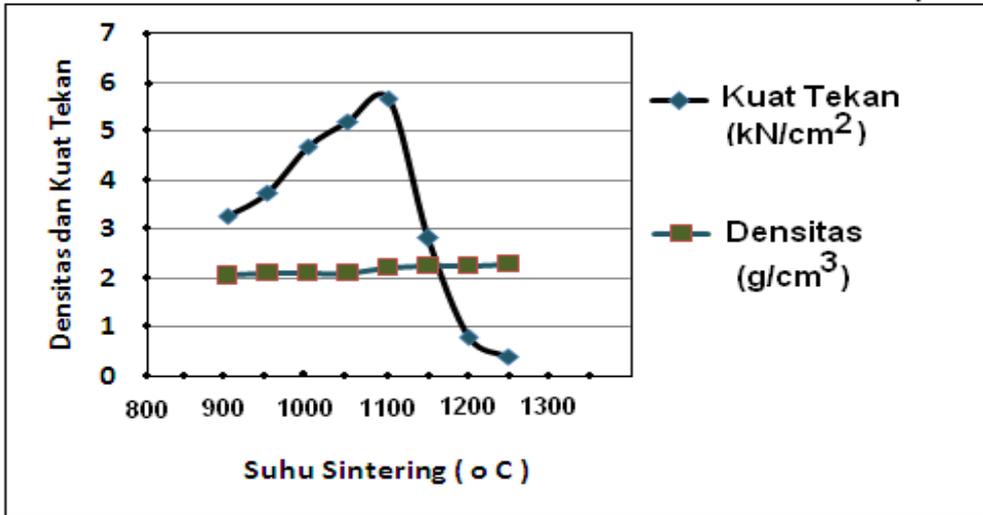
Dari perbandingan komposisi tersebut dapat diketahui bahwa komposisi prekursor oksida utama (Al_2O_3 , BaO; CaO; dan TiO_2) relatif sama kecuali kecuali ZrO_2 pada *synroc* standar yang digantikan SiO_2 pada *synroc* yang menggunakan ATB, sehingga jenis *synroc* yang menggunakan ATB akan terbentuk *Synroc Supercalcine Silico-Titanate*. Adanya SiO_2 pada *synroc* yang menggunakan ATB akan terbentuk pula fase turunan $\text{UO}_2\text{-Pollucite}$: $[(\text{UO}_2)$

$(\text{AlSi}_2\text{O}_6)_2]$ dan $\text{UO}_2\text{-Feldspar}$ $[(\text{UO}_2)\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$ seperti ditunjukkan pada persamaan (5) dan (6) [5]. Kandungan Na_2O dan Fe_2O_3 dalam *synroc* yang menggunakan ATB juga akan memungkinkan terbentuknya fase *freudenbergite* ($\text{Na}_2\text{Fe}_2\text{Ti}_6\text{O}_{16}$). Adanya kandungan K_2O dan Na_2O dapat menurunkan titik lebur dan dapat menurunkan suhu sintering [11].

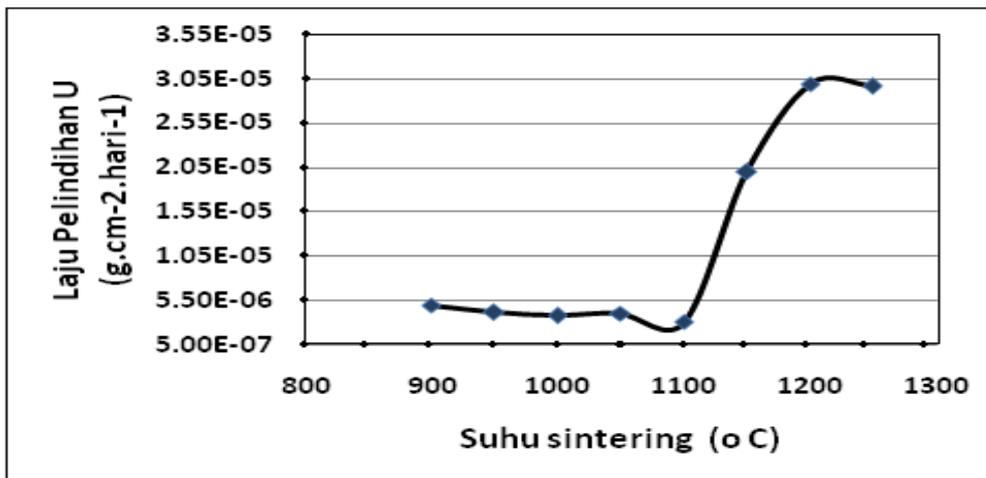
Optimasi suhu sintering pada imobilisasi limbah radioaktif uranium menggunakan bahan matriks *synroc*

Data hasil pengujian densitas, kuat tekan, dan laju pelindihan uranium pada sampel blok *synroc* dengan ATB (*supercalcine silico-titanate synroc*)

dengan tingkat muat limbah 30 % berat dan waktu sintering 3 jam untuk variasi suhu 900-1300 °C (untuk mendapatkan suhu optimum pada proses sintering) ditunjukkan pada Gambar 1 dan 2



Gambar 1. Pengaruh suhu sintering terhadap densitas dan kuat tekan blok *synroc* limbah (tingkat muat limbah 30 % dan waktu sintering 3 jam)



Gambar 2. Pengaruh suhu sintering terhadap laju pelindihan uranium (pada medium air 100 °C) dari blok *synroc* limbah (tingkat muat limbah 30 % dan waktu sintering 3 jam)

Pada Gambar 1 ditunjukkan bahwa semakin tinggi suhu sintering nilai densitas blok *synroc* limbah tersebut relatif makin meningkat. Hal ini karena semakin tinggi suhu berarti energi panas yang diberikan selama proses sintering semakin besar. Pemberian energi yang semakin besar menyebabkan terjadinya difusi dan pembentukan fase-fase mineral *synroc*, serta pertumbuhan dan pengaturan butir fase-fase mineral *synroc* juga semakin cepat dan makin

sempurna, sehingga pori-pori antar butir semakin berkurang. Setelah proses sintering blok *synroc* limbah terjadi penyusutan volume karena terbentuk suatu keramik multi-fase yang padat dan kompak sehingga nilai densitasnya semakin meningkat dengan makin tingginya suhu sintering. Percobaan dihentikan sampai suhu 1300 °C, karena pada suhu ≥ 1400 °C blok *synroc* limbah meleleh dan lengket dengan cawan. Selain itu menurut Stewart (1994)

dinyatakan bahwa proses pembentukan untuk *synroc* standar dapat dicapai pada suhu ~ 1200 °C [11]. Kondisi optimum untuk blok *synroc* dengan ATB diperoleh pada suhu sintering 1100 °C dengan harga densitas yaitu sebesar 2,28 g/cm³.

Pada Gambar 1 menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu sintering, nilai kuat tekan blok *synroc* limbah tersebut relatif makin meningkat kemudian menuju titik optimum. Hal ini sesuai dengan fenomena peningkatan densitas, bahwa kenaikan suhu sintering akan menaikkan densitas dan juga kuat tekan blok *synroc* limbah. Suhu sintering untuk blok *synroc* dengan ATB optimum pada suhu 1100 °C, yaitu relatif lebih rendah daripada suhu optimum blok *synroc* standar pada suhu 1200 °C [5,6]. Hal ini menunjukkan adanya pengaruh kandungan K₂O dan Na₂O yang titik leburnya rendah sehingga dapat menurunkan titik lebur *synroc*, sementara proses sintering dilakukan sebelum terjadinya peleburan.

Penurunan kuat tekan setelah suhu sintering > 1100 °C menunjukkan adanya beberapa komponen penyusun terutama oksida logam alkali yang mempunyai titik lebur rendah lepas dan meninggalkan pori-pori *synroc* yang mengakibatkan terjadinya penurunan kuat tekan. Kondisi optimum untuk blok *synroc* dengan ATB diperoleh pada suhu sintering 1100 °C dengan harga densitas 2,28 g/cm³ dan kuat tekan 5,57 kN/cm².

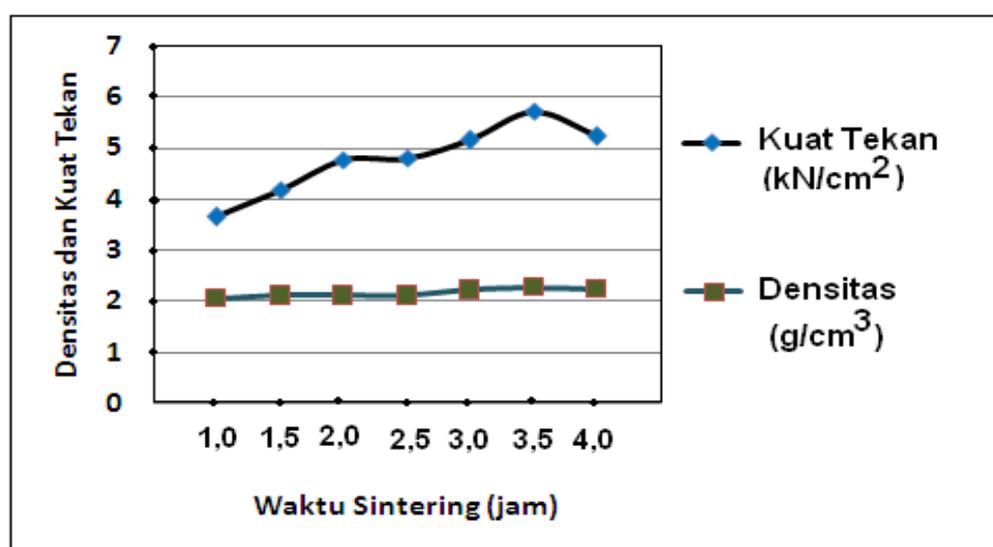
Pada Gambar 2 menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu sintering, laju pelindihan uranium blok *synroc* standar limbah semakin menurun. Hal ini seiring dengan meningkatnya

densitas dan kuat tekan blok *synroc* limbah karena pembentukan fase-fase mineral *synroc* semakin sempurna dan terbentuk suatu keramik multi-fase yang padat dan kompak sehingga unsur-unsur dalam limbah semakin terkungkung lebih kuat dan tidak mudah terlindih oleh air. Penurunan laju pelindihan uranium mencapai minimum pada suhu sintering 1100 °C, kemudian meningkat pada suhu sintering > 1100 °C. Hal ini seiring dengan adanya penurunan kuat tekan (Gambar 1) setelah suhu sintering > 1100 °C, yaitu akibat adanya beberapa komponen (oksida logam alkali) yang lepas pada suhu lebih tinggi sehingga menurunkan kekompakan *synroc* dan menurunkan sifat pengungkungannya terhadap uranium.

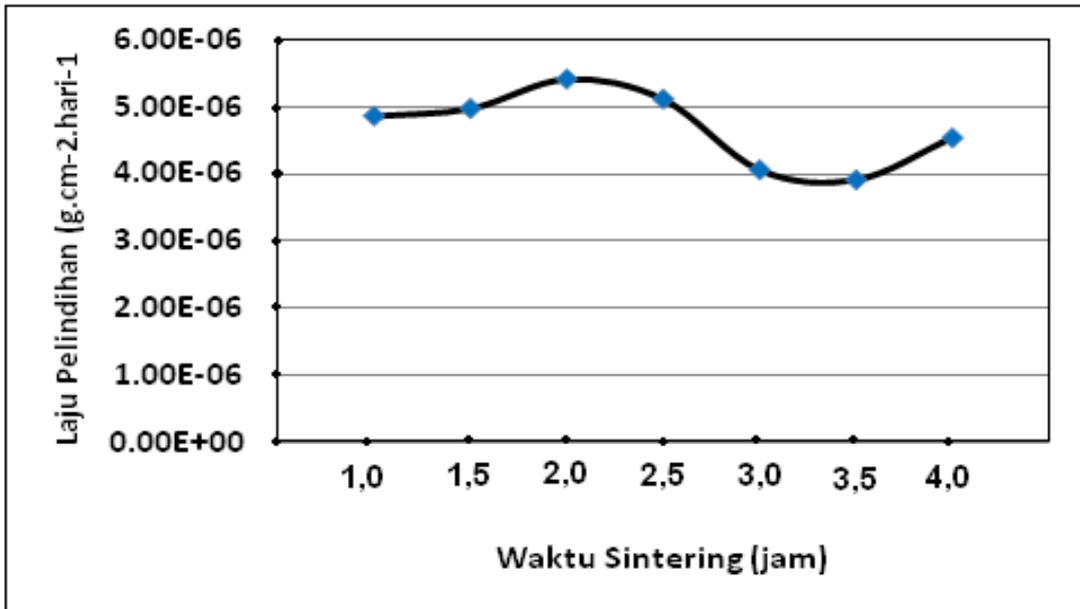
Berdasarkan hasil uji karakteristik blok *synroc* limbah diperoleh kondisi proses sintering terbaik untuk blok *synroc* dengan ATB diperoleh pada suhu sintering 1100 °C, dengan nilai densitas 2,28 g/cm³, kuat tekan 5,57 kN/cm², dan laju pelindihan uranium 1,05x10⁻⁶ g.cm⁻².hari⁻¹.

Optimasi waktu sintering pada immobilisasi limbah radioaktif uranium menggunakan bahan matriks *synroc*

Data hasil pengujian densitas, kuat tekan, dan laju pelindihan uranium pada sampel blok *synroc* dengan ATB (*supercalcine silico-titanate synroc*) untuk mendapatkan waktu optimum pada proses sintering ditunjukkan pada Gambar 3 dan 4. Kondisi percobaan adalah : tingkat muat limbah (*waste loading*) 30 % berat, pada suhu sintering optimum pada 1100 °C, sedang waktu sintering divariasasi antara 1- 4 jam.



Gambar-3. Pengaruh waktu sintering terhadap densitas dan kuat tekan untuk blok *synroc* limbah yang menggunakan ATB pada suhu sintering 1100 °C (tingkat muat limbah 30 % berat)



Gambar-4. Pengaruh waktu sintering terhadap laju-pelindihan uranium untuk blok *synroc* limbah yang menggunakan ATB pada suhu sintering 1100 °C (tingkat muat limbah 30 % berat)

Fenomena yang terjadi pada parameter waktu sintering adalah sama seperti pada parameter suhu sintering. Proses sintering diperlukan energi yang kuantitasnya tergantung pada suhu dan waktu sintering, sehingga densitas dan kuat tekan blok *synroc* limbah naik dengan naiknya suhu dan waktu sintering.

Pada Gambar-3 (hasil pengujian densitas dan kuat tekan) menunjukkan bahwa kondisi optimum proses sintering untuk blok *synroc* limbah menggunakan ATB dicapai pada waktu sintering selama 3,5 jam. Pada kondisi optimum, harga densitas dan kuat-tekan blok *synroc* limbah yang menggunakan ATB adalah 2,29 g/cm³ dan 5,76 kN/cm².

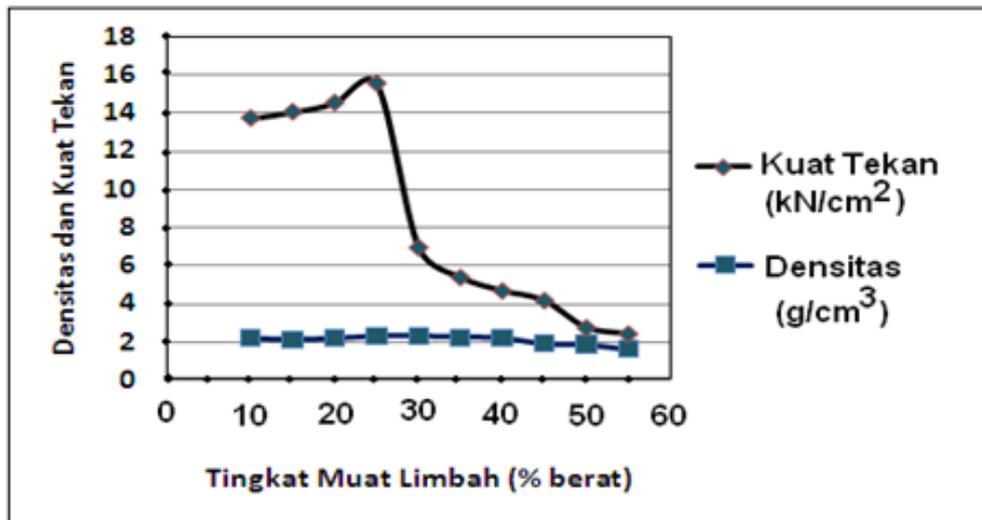
Fenomena tersebut diatas juga mempengaruhi laju pelindihan yang ditunjukkan pada Gambar-4. Penambahan waktu sintering akan memberikan kesempatan terjadinya pembentukan fase mineral *synroc* diikuti dengan penangkapan unsur-unsur radioaktif kedalam kisi-kisi fase mineral dalam blok *synroc* limbah. Semakin kuat ikatan antar butir dan pembentukan keramik multifase yang kuat dan padat sehingga laju pelindihan uranium menurun. Hal ini dapat ditunjukkan bahwa laju pelindihan uranium menurun dengan bertambahnya waktu sintering. Laju pelindihan uranium untuk blok

synroc limbah menggunakan ATB adalah sangat rendah dan penurunannya tidak signifikan. Kondisi optimum dengan laju pelindihan uranium terendah yaitu 1,05x10⁻⁶ g.cm⁻².hari⁻¹ dicapai pada waktu sintering 3,5 jam.

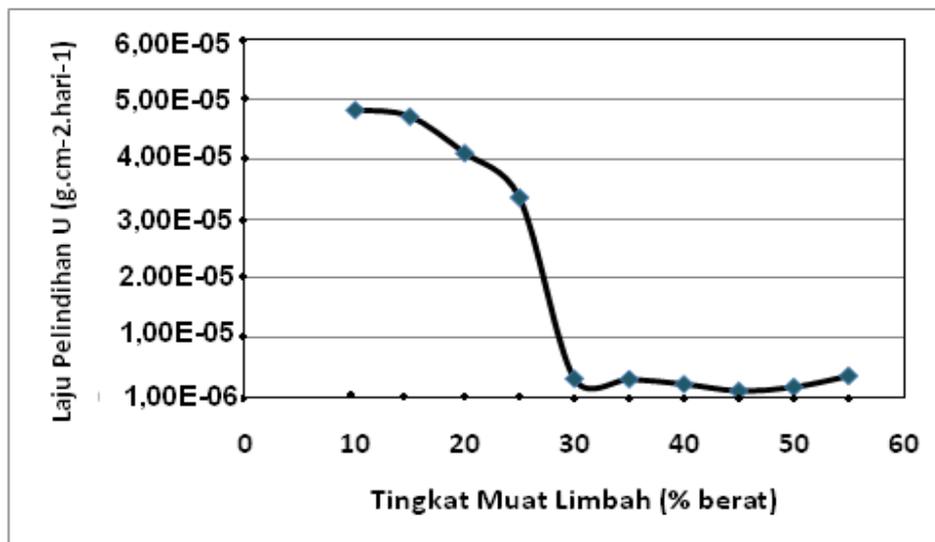
Optimasi tingkat muat limbah pada immobilisasi limbah radioaktif uranium menggunakan bahan matriks *synroc*

Data hasil pengujian densitas, kuat tekan, dan laju pelindihan uranium pada sampel blok *synroc* limbah dengan ATB (*supercalcine silico-titanate synroc*) untuk mendapatkan tingkat muat limbah optimum ditunjukkan pada Gambar 5 dan 6. Kondisi percobaan adalah : tingkat muat limbah (*waste loading*) 10-50 % berat, pada suhu sintering optimum 1100 °C dan waktu sintering 3,5 jam.

Pada Gambar-5 menunjukkan bahwa tingkat muat limbah optimum untuk blok *synroc* limbah dicapai pada tingkat muat limbah 25 % berat. Pada kondisi optimum tersebut, harga densitas dan kuat-tekan untuk blok *synroc* limbah yang menggunakan ATB adalah 2,295 g/cm³ dan 15,56 kN/cm².



Gambar-5. Pengaruh tingkat muat limbah terhadap densitas dan kuat tekan untuk blok *synroc* limbah yang menggunakan ATB pada suhu sintering 1100 °C dan waktu sintering 3,5 jam.



Gambar-6. Pengaruh tingkat muat limbah terhadap laju pelindihan uranium untuk blok *synroc* limbah yang menggunakan ATB pada suhu sintering 1100 °C dan waktu sintering 3,5 jam.

Pada Gambar-6 menunjukkan bahwa makin naik tingkat muat limbah memperlihatkan laju pelindihan uranium menurun, hal ini menunjukkan bahwa makin tinggi tingkat muat limbah maka makin tinggi kandungan uranium yang dapat membentuk fase turunan, dalam hal ini uranium adalah sebagai unsur pembentuk fase *pollucite* [(UO₂) (AlSi₂O₆)₂] dan fase *feldspar* [(UO₂)Al₂Si₂O₈] seperti ditunjukkan pada persamaan (5) dan (6). Dengan pembentukan fase turunan tersebut, maka uranium terikat lebih kuat dan sulit terjadinya pelindihan. Pada Gambar-6 menunjukkan bahwa tingkat muat limbah optimum untuk blok *synroc* limbah yang menggunakan ATB dicapai pada tingkat muat limbah 30 % berat. Pada kondisi optimum

tersebut, harga laju pelindihan adalah minimum, kemudian dengan tingkat muat yang lebih tinggi, laju pelindihan uranium relatif tetap harganya antara 1,78x10⁻⁶ – 3.16x10⁻⁶ g.cm⁻².hari⁻¹. Hal ini berarti untuk tingkat muat 30 sampai 50 % berat, laju pelindihan uranium sangat rendah menunjukkan kualitas blok *synroc* sangat baik. Kualitas terbaik blok *synroc* limbah menggunakan ATB diperoleh pada tingkat muat limbah 30 % berat, suhu sintering 1100 °C selama 3,5 jam dengan harga densitas adalah 2,29 g/cm³, harga kuat-tekan adalah 6,97 kN/cm², dan laju pelindihan uranium 3,16x10⁻⁶ g.cm⁻². hari⁻¹. Sedang pada tingkat muat limbah 40 % berat, harga densitas 2,29 g/cm³, kuat tekan 4,71

kN/cm², dan laju pelindihan uranium 2,24x10⁻⁶ g.cm⁻².hari⁻¹.

Kualitas blok *synroc* limbah menggunakan ATB tersebut dengan proses sintering sesuai dengan kualitas blok *synroc* limbah dengan proses pres-panas isostatik (HIP) yang mempunyai densitas antara 2,1 – 3,4 g/cm³ [7] dan laju pelindihan uranium antara 5,0x10⁻⁴ – 6,0x10⁻⁶ g.cm⁻².hari⁻¹ [8]. Kualitas blok *synroc* limbah tersebut juga memenuhi kualitas blok *synroc* yang direkomendasikan oleh IAEA (*International Atomic Energy Agency*) bahwa harga kuat tekan adalah 2-5 kN/cm² dan laju-pelindihan 1,7x10⁻¹ – 2,5x10⁻⁴ g.cm⁻². hari⁻¹ [14]. Imobilisasi limbah uranium dengan bahan matriks *synroc* menggunakan ATB (*synroc supercalcine silico-titanate*) dapat digunakan sebagai alternatif bahan *synroc* untuk mengganti bahan matriks *synroc* standar.

KESIMPULAN

Proses imobilisasi limbah *sludge* yang mengandung uranium menggunakan Abu Terbang Batubara (ATB) sebagai bahan matriks *Synroc Supercalcine Silico-Titanate* dengan tingkat muat limbah 30 % diperoleh suhu sintering terbaik pada 1100 °C selama 3,5 jam, dengan densitas blok *synroc* limbah 2,29 g/cm³, kuat tekan 6,97 kN/cm², dan laju pelindihan uranium (pada suhu air 100 °C) adalah 3,16x10⁻⁶ g.cm⁻².hari⁻¹. Kualitas blok *synroc* limbah dengan proses sintering ini sesuai dengan kualitas hasil blok *synroc* limbah dengan proses pres-panas isostatik yang mempunyai densitas 2,1 – 3,4 g/cm³, dan laju pelindihan uranium (pada medium air suhu 100 °C) antara 5,0x10⁻⁴ – 6,0x10⁻⁶ g.cm⁻².hari⁻¹. Kualitas hasil blok *synroc* limbah tersebut juga memenuhi kualitas yang direkomendasikan oleh IAEA yaitu kuat tekan 2-5 kN/cm² dan laju pelindihan 1,7x10⁻¹ - 2,5x10⁻⁴ g.cm⁻².hari⁻¹.

DAFTAR PUSTAKA

1. ZAINUS SALIMIN, GUNANDJAR, DAN ACHMAD ZAID., Pengolahan Limbah Radioaktif Cair Dari Dekomisioning Fasilitas Pemurnian Asam Fosfat Petrokimia Gresik Melalui Proses Oksidasi Biokimia, *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Lingkungan Vi*, ITS, Surabaya, 2009.
2. MANSON BENEDICT, THOMAS H. PIGFORD, AND HANS WOLFGANG LEVI, "Nuclear Chemical Engineering", *Second Edition*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1981.
3. MENLH, Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No. Kep.02 / Menlh / 1988 Tentang Pedoman Penetapan Baku Mutu Lingkungan, 1998.
4. BAPETEN, 1999, Keputusan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir No. 02/Ka.Bapeten/V-99, Tentang Baku Tingkat Radioaktivitas Di Lingkungan.
5. VANCE, E.R., "Status Of Synroc Ceramics For HLW", *Proceedings Of The 2nd Biannual Int. Workshop On Hlrw Management*", Dep. Of Nuclear Engineering, Fac. Of Engeneering, Gadjah Mada Univ., Yogyakarta, 1999.
6. RINGWOOD, A.E., KESSON, S.E., REEVE, K.D., LEVINS, D.M., AND RAMM, E.J., "Radioactive Wasteforms For The Future"(Eds W.Lutze And R.C.Ewing), *Elsevier, Amsterdam*, P.233-334, 1998 .
7. LEVINS, DM., AND JOSTSONS, A., R&D In Radioactive Waste Management At Ansto, *Regional Corporation In Asia, The 2nd Seminar On Radioactive Waste Management*, Kuala Lumpur, Malaysia, October 14-18, 1996.
8. RINGWOOD A.E, OVERBY, V.M., KESSON, S.E., "SYNROC : LEACHING PERFORMANCE AND PROCESS TECHNOLOGY," *Proceedings Of The International Seminar On Chemistry And Process Engineering For High Level Liquid Waste Solidification*, Julich, P. 221-229, 1981.
9. BEGG, et.al., Low-risk Waste Forms to Lock-up High-Level Nuclear Waste, *Proceeding of the Symposium on Waste Management (WM'05 Symposium)*, Tucson-Arizona, 2005.
10. MUHAYATUN, 2013, Laporan Hasil Pengujian Sampel Abu Batubara (*Fly-Ash* dan *Bottom-Ash*) dari PLTU Suralaya, Lab. PTNBR-BATAN Bandung, 10 Juli 2013.
11. STEWART, M.W.A., Sintering of Synroc, *Proc. Int. Ceramic Conference Austceram 94, Sydney*, July 25-27, 1, p. 301-309, 1994.
12. MARTONO, H., *Characterization of Waste Glass and Treatment of High Level Liquid Waste*, Training Report on Treatment of HLLW and Characterzation of Waste Glass at Tokai Works, PNC, Japan, 1988.
13. HESPE, E.D., Leach Testing of Immobilized Waste Solids, A Proposal for a Standar Method., *Atomic Energy Review*, 9, p.1-12, 1971.
14. IAEA, *Caracterization of Radioactive Waste Form and Packages*, Technical

- Report Series No. 383, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1997.
15. GUNANDJAR, Synroc Performance for Immobilization of High Level Liquid Radioactive Waste, Proceedings of The International Conference on Basic Science 2011 (ICBS-2012), University of Brawijaya, Malang-Indonesia, p.227-232, 17-18 Feb 2011.
16. LEVINS, D.M., "ANSTO's Waste Management Action Plan", *Third Seminar on RWM, Nuclear Cooperation in Asia*, China, 1997.

PENGELOLAAN LIMBAH CAIR DENGAN PENDEKATAN KONSEP EKO-EFISIENSI: ANALISIS HUBUNGAN ANTARA PENERAPAN PROGRAM *CLEANER PRODUCTION* DI AREA PRODUKSI DENGAN KINERJA INSTALASI PENGOLAHAN AIR LIMBAH (IPAL)

Wahyu Wikandari¹⁾, Roekmijati Widaningroem Soemantojo²⁾, Tri Edhi Budhi Soesilo³⁾

¹⁾Lulusan Program Studi Ilmu Lingkungan, Fakultas Pascasarjana, Universitas Indonesia, Jakarta

²⁾³⁾Dosen Program Pascasarjana Universitas Indonesia

Email: wikandari21@gmail.com

ABSTRAK

PENGELOLAAN LIMBAH CAIR DENGAN PENDEKATAN KONSEP EKO-EFISIENSI. Salah satu perusahaan yang memproduksi sabun, kosmetik, dan bahan pembersih rumah tangga di Provinsi Banten telah melakukan perbaikan Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL), namun kualitas air limbahnya belum memenuhi standar baku mutu secara konsisten, sehingga perlu dilakukan program *cleaner production* di area produksi. Penelitian ini bertujuan menganalisis hubungan antara penerapan program *cleaner production* di area produksi dengan kinerja IPAL, menghitung keuntungan ekonomi, dan rasio eko-efisiensi, dengan keikutsertaan karyawan didalamnya. Penelitian dilakukan dengan pendekatan kuantitatif serta *mixmethod*. Hasil analisis menunjukkan korelasi positif dan signifikan antara keberhasilan program *cleaner production* di area produksi yang sejalan dengan peningkatan pengetahuan, sikap, dan perilaku pekerja melalui penurunan COD outlet IPAL sebesar 67%; biaya pengolahan air limbah di perusahaan menurun 21%; dan rasio eko-efisiensi penggunaan air naik sebesar 2%. Hal ini memperlihatkan bahwa program *cleaner production* di area produksi dan optimalisasi kinerja IPAL merupakan bagian dari konsep eko-efisiensi, yang memberikan manfaat ekonomi dan juga manfaat lingkungan bagi perusahaan.

Kata kunci: Eko-efisiensi, *Cleaner Production*, Kinerja IPAL, Industri Sabun

ABSTRACT

MANAGEMENT OF THE LIQUID WASTE THROUGH APPROACH OF THE ECO-EFFICIENCY CONCEPT. One of the companies that manufacture of soap, cosmetic, and household products in Banten Province has made improvements of Waste Water Treatment Plant (WWTP), however quality of the waste water effluent did not meet the quality standards applied yet with consistently, so that proceeded with implementing the *cleaner production* program in production area. This study was conducted to analyze correlation between implementation of the *cleaner production* program on production area and performance of the WWTP and also to calculate the economic benefits and ratio of the eco-efficiency, with involvement of the employee definitely. The study was using a quantitative approach and the mix methods. Result of the analysis shows positive and significant correlation between successfully of the *cleaner production* program that aligned with improvement of knowledge, attitude, and behavior level of workers by decreasing COD of IPAL by 67%; cost of waste water treatment in the company decreased by 21%; and increased eco-efficiency ratio of water by 2%. Thus, implementing the *cleaner production* program on production area and optimizing the WWTP performance are part of eco-efficiency approach will deliver economic and environmental benefits to the company.

Key words : Eco-efficiency, *Cleaner Production*, Performance of WWTP, Soap Industri

PENDAHULUAN

Perkembangan pesat peradaban manusia dalam ilmu pengetahuan dan teknologi telah mengubah berbagai dimensi kehidupan manusia dan lingkungannya. Penerapan ilmu pengetahuan dan teknologi serta meningkatnya pasar dan daya beli masyarakat mendorong tumbuhnya berbagai sektor industri di Indonesia, salah satunya adalah industri manufaktur untuk *Fast Moving Consumer Goods* (FMCG). Manufaktur adalah

suatu cabang industri yang mengaplikasikan mesin, peralatan, dan sumber daya manusia dalam suatu proses untuk mengubah bahan mentah menjadi barang jadi untuk dijual [1]. Industri FMCG adalah industri yang menghasilkan produk-produk yang dapat terjual cepat, harganya relatif murah, merupakan kebutuhan sehari-hari, dan biasanya memiliki *shelf life* pendek [2].

Dampak positif pertumbuhan industri FMCG yang pesat, disatu sisi mendorong pertumbuhan ekonomi dengan peningkatan daya beli serta memenuhi kebutuhan masyarakat. Namun demikian dampak negatif dari industri FMCG juga perlu diwaspadai, diantaranya dampak pada lingkungan hidup. Dampak tersebut berasal dari buangan limbah yang bersifat cair, gas, maupun padat. Limbah cair dari buangan industri harus memenuhi standar baku mutu yang ditetapkan [3], karena dapat merusak lingkungan terutama badan sungai.

Permasalahan terkait lingkungan pada intinya ada pada masalah hubungan makhluk hidup dengan lingkungan alam atau buatan. Ilmu lingkungan tidak dapat dilepaskan dari ilmu ekologi yang mempelajari hubungan timbal balik dan kebergantungan antara makhluk hidup dengan lingkungan. Tujuan ilmu lingkungan adalah untuk mencapai pengelolaan terhadap lingkungan hidup yang lestari dengan memahami kebergantungan maupun interaksi dari empat komponen utama dari sistem pendukung kehidupan bumi, yaitu atmosfer (udara), hidrosfer (air), geosfer (batu, tanah, dan sedimen), dan biosfer (makhluk hidup) [4]. Selanjutnya prinsip *interdependensi* dapat menegaskan kenyataan yang hakiki dalam alam bahwa semua anggota dalam komunitas ekologis, termasuk manusia, berada dalam satu kesatuan mata rantai yang saling terkait dalam sebuah jaringan relasi yang luas dan rumit, yang disebut jaring kehidupan [5].

Menurut Hukum Termodinamika ke-2, semua kegiatan termasuk kegiatan pembangunan akan menaikkan *entropi*, yaitu ketidakteraturan. Bentuk kenaikan *entropi* salah satunya adalah pencemaran. Berdasarkan hukum ini, industri pasti melepaskan zat pencemar ke dalam lingkungan, karena *zero emission* dalam arti harfiah adalah mustahil. Pencemaran tidak dapat dihindari, namun pencemaran itu dapat dikurangi sampai sekecil-kecilnya [6].

Prinsip yang dipilih untuk penelitian ini adalah prinsip *interdependensi* yang mengkaji kebergantungan antara manusia, alat serta cara pengelolaan air limbah. Pengelolaan lingkungan yang baik akan menjadi penentu dalam menjaga keseimbangan alam. Jika teori *interdependensi* yang digunakan, maka diperlukan teori lainnya yang mendukung seperti teori pengelolaan lingkungan, teori eko-efisiensi, teori pengelolaan air limbah, teori *cleaner production*, teori *end of pipe technology*, serta teori pengetahuan, sikap, dan perilaku untuk menyelesaikan masalah yang dihadapi.

Limbah adalah materi yang terbuang dalam proses produksi dan tidak berakhir dalam

produk. Pengurangan limbah merupakan upaya penghematan yang menjadikan perusahaan semakin kompetitif untuk menghadapi persaingan bisnis. Seiring dengan makin tingginya kepedulian akan kelestarian lingkungan oleh dunia usaha maka muncul upaya industri, termasuk industri FMCG untuk melakukan pengurangan air limbah industrinya melalui perencanaan proses produksi yang lebih efisien. Meningkatnya efisiensi produksi akan mengurangi materi yang terbuang yang diikuti dengan menurunnya biaya produksi dan dampak lingkungan. Manajemen bisnis yang memadukan keterkaitan efisiensi ekonomi dan efisiensi lingkungan disebut eko-efisiensi [6]. Eko-efisiensi merupakan strategi atau pendekatan yang bertujuan untuk menjaga keselarasan antara penggunaan sumber daya yang digunakan (ekonomi) dan polutan yang dikeluarkan (ekologi) dari kegiatan ekonomi [7].

Pendekatan eko-efisiensi ini dapat meminimalkan volume limbah dengan mencegah terbentuknya limbah yang banyak sehingga proses produksi lebih bersih (*cleaner production*). Inti dari produksi bersih (*cleaner production*) adalah mencegah, mengurangi, menghilangkan terbentuknya limbah dan pencemar pada sumbernya di seluruh daur hidup yang dicapai dengan penerapan kebijakan pencegahan, penguasaan teknologi bersih dan teknologi akrab lingkungan, serta perubahan mendasar dalam sikap atau perilaku manajemen [8].

Cleaner production dapat meminimalkan biaya pengolahan limbah pada area penghasil limbah maupun pada *end of pipe technology* [6]. Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) merupakan salah satu *end of pipe technology* yang secara umum prosesnya dapat dibedakan menjadi proses fisika, proses kimia, dan proses biologi. Proses fisika dan kimia diaplikasikan untuk menghilangkan padatan terlarut, senyawa yang tidak *biodegradable*, logam-logam, dan materi-materi kasar. Proses biologi ditujukan untuk menghilangkan bahan-bahan organik terutama yang terlarut dalam air limbah [9].

Kinerja IPAL di sebuah industri terkait langsung dengan kualitas air limbah yang akan dibuang. Air limbah yang tidak memenuhi baku mutu, apabila dibuang ke saluran umum atau badan sungai akan berdampak pada kerusakan lingkungan dan memberikan pengaruh pada masyarakat disekitarnya. Keberhasilan proses pengolahan air limbah bergantung pada penentuan teknologi yang tepat berdasarkan karakteristik fisika dan kimia air limbah yang akan diolah, sumber daya manusia yang mengoperasikannya, serta faktor operasional pendukung lainnya, seperti metode pembersihan,

bahan baku yang digunakan, serta perbaikan kondisi fasilitas mesin pada area produksi juga dapat mengoptimalkan pengolahan akhir air limbah [10].

Pemantauan pada operasional perusahaan juga diperlukan untuk mengendalikan dan mengurangi kadar pencemar yang terkandung dalam air limbah sebelum dialirkan ke IPAL. Komitmen perusahaan dalam bentuk kebijakan manajemen terkait pengelolaan lingkungan yang serius di sebuah organisasi merupakan langkah awal tercapainya keberhasilan pengelolaan air limbah melalui program *cleaner production*. Pengetahuan, sikap dan perilaku pekerja juga ikut berpengaruh pada penerapan eko-efisiensi [11].

PT XYZ merupakan salah satu perusahaan yang bergerak dalam bidang industri FMCG, yang memproduksi kosmetik, dan bahan pembersih keperluan rumah tangga. Unit pengolahan limbah cair pada IPAL di PT XYZ terdiri atas unit fisika, kimia dan biologi. Pengolahan secara fisika dilakukan pada bak *equalisasi*. Unit pengolahan kimia terdiri atas proses koagulasi dan flokulasi yang menggunakan bahan kimia dan dilanjutkan dengan proses pemisahan padatan dan cairan. Pengolahan biologi berlangsung pada bak biologi secara *aerob*.

Limbah cair dari PT XYZ mengandung bahan organik yang tinggi, terdiri atas *biodegradable* dan *non-biodegradable* material, yang berasal dari produksi sabun, sampo, dan produk perawatan tubuh lainnya. Sejalan dengan peningkatan kapasitas produksi dan jenis produk yang dihasilkan, pada akhir tahun 2012, PT XYZ melakukan penambahan beberapa *line* baru yang memproduksi produk bahan keperluan rumah tangga yang belum ada sebelumnya. Sejak saat itu, perusahaan mengalami hambatan dalam melakukan pengolahan air limbahnya, sehingga hasilnya tidak memenuhi standar baku mutu secara konsisten dan harus melakukan upaya pengolahan lanjutan setelah keluar dari *outlet* IPAL.

Perusahaan ini selanjutnya memutuskan untuk melakukan perbaikan IPAL-nya, terutama pada unit pengolahan kimia. Gambar 1 adalah hasil pemantauan debit dan beban *Chemical Oxygen Demand* (COD) air limbah rata-rata di PT XYZ setelah dilakukan perbaikan IPAL. Hasil pemantauan memperlihatkan bahwa debit dan beban COD air limbah masih memenuhi desain kriteria IPAL, namun faktanya hasil pengolahan IPAL tersebut masih belum

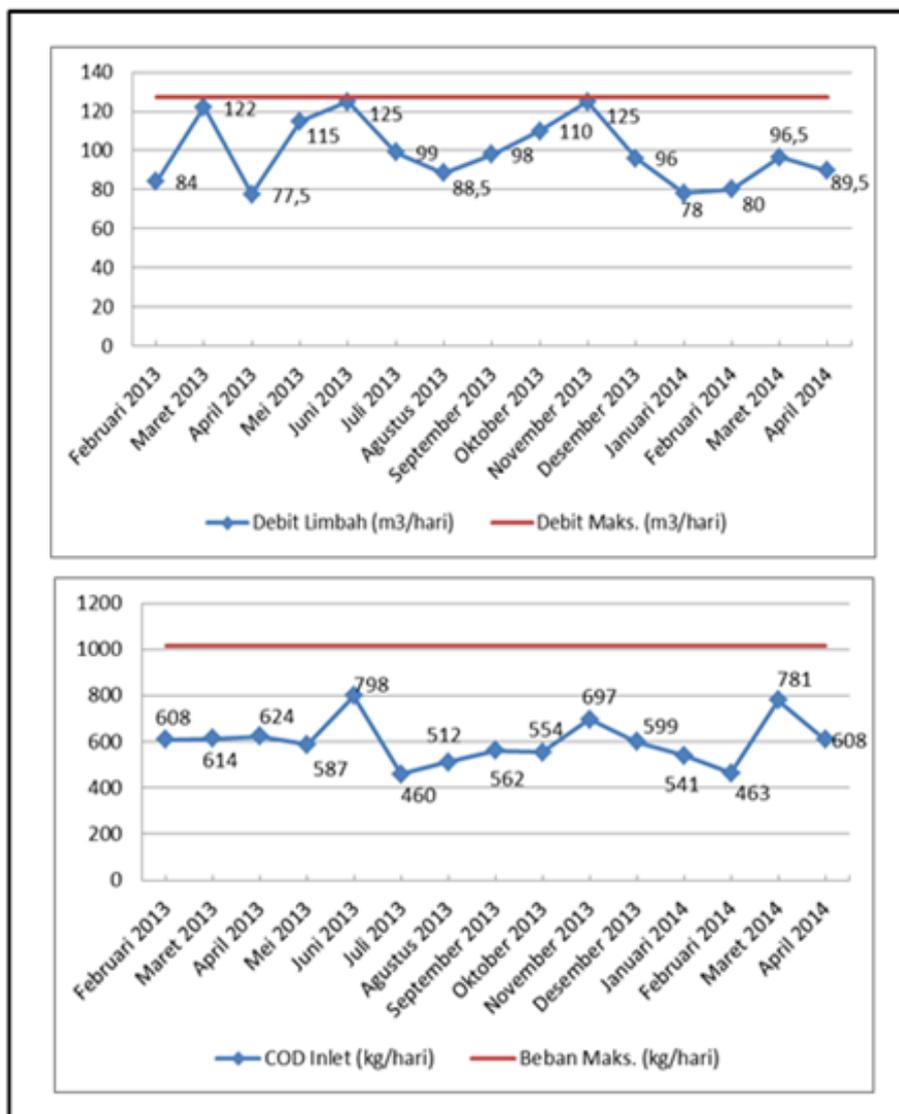
memenuhi standar baku mutu secara konsisten. Berdasarkan pengamatan di lapangan, diketahui bahwa perubahan debit air limbah sangat fluktuatif, sehingga menyulitkan proses optimalisasi kinerja IPAL. Gambar 1 juga memperlihatkan bahwa debit air limbah yang diolah berada pada batas atas dari desain kapasitas operasional IPAL. Oleh karena itu, pengurangan volume air limbah di PT XYZ diperlukan sejalan dengan penurunan konsentrasi air limbah melalui program *cleaner production*.

Komitmen PT XYZ untuk melakukan optimalisasi IPAL melalui penerapan *cleaner production* dimulai sejak awal tahun 2014. Program *cleaner production* dijalankan dengan melakukan pengurangan air limbah baik dari volume dan konsentrasi limbah (*chemical load*) yang dihasilkan mulai fokus dilakukan sejak bulan April 2014. *Cleaner production* ini dijalankan dengan melakukan perbaikan pada operasional atau proses dan teknologi atau fasilitas di bagian produksi dan bagian pendukung lainnya.

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah: PT XYZ sudah melakukan perbaikan pada IPAL, namun kualitas air limbahnya masih belum memenuhi standar baku mutu, padahal apabila optimalisasi IPAL sudah diterapkan dengan tepat, baku mutu air limbah dapat terpenuhi dan perusahaan akan mendapatkan keuntungan secara ekonomi melalui penurunan biaya. Penerapan konsep eko-efisiensi di PT XYZ dilanjutkan dengan program *cleaner production*, yang sejalan dengan program untuk meningkatkan pengetahuan, sikap, dan perilaku pekerjanya.

Rumusan masalah tersebut menghasilkan pertanyaan penelitian: 1) Bagaimanakah pengaruh pelaksanaan program *cleaner production* pada kinerja IPAL?; 2) Berapakah besarnya penurunan biaya yang dihasilkan dari optimalisasi kinerja IPAL di PT XYZ melalui program *cleaner production* di area produksi?; 3) Berapakah rasio eko-efisiensi penggunaan air yang diperoleh dari pelaksanaan program *cleaner production*?

Adapun tujuan penelitian ini adalah: 1) Menganalisis pengaruh pelaksanaan program *cleaner production* pada kinerja IPAL; 2) Menganalisis besarnya penurunan biaya yang dihasilkan dari optimalisasi kinerja IPAL di PT XYZ melalui program *cleaner production* di area produksi; 3) Mengetahui besarnya rasio eko-efisiensi penggunaan air yang diperoleh dari pelaksanaan program *cleaner production*.



Gambar 1. Hasil Pemantauan Debit Limbah dan Beban COD Sebelum Program *Cleaner Production*

Hipotesis penelitian mengacu pada fakta-fakta dilapangan dan berdasarkan teori yang ada. Hipotesis yang diambil yaitu: pelaksanaan program *cleaner production* di area produksi yang dilakukan sejalan dengan peningkatan pengetahuan, sikap, dan perilaku pekerjadapat mengurangi biaya operasional perusahaan, serta dapat mengoptimalkan kinerja IPAL, menurunkan biaya dalam pengelolaan air limbah, dan menaikkan rasio eko-efisiensi.

METODOLOGI

Penelitian ini dilakukan dengan pendekatan kuantitatif dan metode yang dipilih dalam penelitian ini adalah *mix method*. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan data kuantitatif dan kualitatif yang diperoleh dari

hasil pengamatan lapangan/observasi, kuesioner, dokumentasi, dan telaah pustaka/studi literatur. Selanjutnya untuk mengetahui korelasi parameter-parameter air limbah pada program *cleaner production* yang mempengaruhi kinerja IPAL, dilakukan uji statistik menggunakan teknik korelasi *bivariate* atau *Pearson Product Moment*.

Penelitian ini dilaksanakan dari bulan Juni 2015 sampai dengan bulan November 2015. Terdapat dua populasi dalam penelitian ini:

1. Semua data pengecekan COD dan volume harian air limbah yang dihasilkan pada hari kerja aktif dari tahun 2013 sampai dengan tahun 2015, yang terdiri atas: data COD dan volume air limbah yang menjadi *inlet* IPAL; data COD pada bak *equalisasi* IPAL; data

COD hasil pengolahan unit pemisahan padatan dan cairan/*Lamella* pada unit pengolahan kimia IPAL; dan data COD hasil pengolahan unit biologi IPAL. Pengambilan sampel ditentukan dengan menggunakan metode *purposive sampling* dengan kriteria diambil selama kurun waktu 15 bulan dan diambil dalam sebuah rangkaian proses yang sama dalam satu hari. Data sebelum dilakukannya program *cleaner production* diambil untuk kurun waktu bulan Februari 2013 sampai dengan bulan April 2014; dan data sesudah dilakukannya program *cleaner production* diambil dalam kurun waktu bulan Mei 2014 sampai dengan bulan Juli 2015.

2. Populasi kedua adalah semua pekerja yang terlibat dalam proses produksi di area manufaktur (*mixing process*). Penentuan sampel ini dilakukan menggunakan metode *saturated sampling*, yaitu semua kelompok manajemen operator yang ada di area tersebut.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Analisis Sumber dan Karakteristik Limbah Cair di PT XYZ

Limbah cair di PT XYZ, sebagian besar dihasilkan dari proses pencucian peralatan di area manufaktur dan mesin *filling* produksi. Air bilasan pertama pencucian peralatan biasanya masih mengandung produk dengan konsentrasi yang tinggi, dan air bilasan selanjutnya cenderung lebih kecil konsentrasi kandungannya. Seluruh air limbah yang dihasilkan pada proses produksi akan dialirkan ke bak penampungan untuk selanjutnya dipompa ke IPAL.

Limbah cair yang dihasilkan dari proses pencucian, mengandung senyawa-senyawa organik. Kandungan COD air limbah hasil proses pencucian di PT XYZ, antara lain:

- a. Sebagian besar adalah surfaktan (*surface active agent*). Surfaktan merupakan zat aktif permukaan yang berfungsi menurunkan tegangan permukaan air, sehingga dapat melepaskan kotoran yang menempel pada permukaan bahan. PT XYZ menggunakan jenis *Sodium Lauryl Sulphate* (SLS), yang merupakan deterjen jenis lunak, yang mudah dirusak oleh mikroorganisme [12].
- b. Jenis bahan baku lain yang mengandung lemak dan alkohol.

- c. Bahan *additives*, yang merupakan bahan tambahan untuk membuat produk lebih menarik dan hanya ditambahkan sedikit sekali jika dibandingkan dengan SLS. Biasanya bahan *additives* ini ditambahkan dengan maksud untuk komersialisasi suatu produk. Contoh yang biasa digunakan adalah enzim, *cellulose*, dan pewarna yang sebageian besar termasuk bahan *non-biodegradable*.

Program *cleaner production* di PT XYZ diawali dengan melakukan pendataan kandungan COD dan kandungan bahan kimia yang terkandung pada air limbah yang dihasilkan rata-rata per hari, untuk masing-masing area. Berdasarkan pendataan tersebut, diketahui bahwa 73% dari total beban/ konsentrasi bahan kimia pada air limbah yang masuk ke bak *equalisasi* IPAL berasal dari proses pencucian dan pembersihan peralatan di manufaktur (*mixing process*). Oleh karena itu, program *cleaner production* di PT XYZ akan efektif bila difokuskan pada area tersebut.

B. Analisis Kinerja IPAL

Data sekunder air limbah yang diambil oleh peneliti sebelum dan sesudah dilakukannya program *cleaner production* selanjutnya diolah dengan menggunakan *Statistical Package Solution Service* (SPSS), dengan korelasi *bivariate/Pearson Product Moment*. Output yang diperoleh berupa 9 pasangan data yang berkorelasi secara signifikan sebelum dilaksanakannya program *cleaner production* dan 7 pasangan data yang berkorelasi secara signifikan setelah dilaksanakannya program *cleaner production*, seperti terlihat pada Tabel 1.

Analisis Sebelum Dilakukannya *Cleaner Production*

Berdasarkan hasil pengolahan SPSS, diketahui bahwa yang mempunyai pengaruh paling tinggi terhadap *outlet* IPAL adalah unit pengolahan kimia IPAL yang memberikan kontribusi sebesar 47%. Perbandingan nilai *Biochemical Oxygen Demand* (BOD) terhadap COD *inlet* air limbah di PT XYZ lebih kecil dari 0,4. Oleh karenanya, unit pengolahan kimia menjadi bagian yang sangat penting pada pengolahan air limbah di PT XYZ. Kualitas air limbah yang dihasilkan akan baik jika proses pengolahan unit pengolahan kimia berjalan efektif. Oleh karena itu, optimalisasi unit pengolahan kimia IPAL menjadi penting dilakukan jika ingin mengoptimalkan kinerja IPAL secara keseluruhan.

Hasil olahan SPSS juga memperlihatkan keterkaitan antar proses dalam hal kinerja *end of pipe technology* secara keseluruhan. Keberhasilan suatu unit proses akan menentukan keberhasilan proses selanjutnya. Apabila COD *input* IPAL rendah, maka kecenderungannya adalah COD hasil pengolahan unit kimia IPAL akan rendah, dan selanjutnya akan menurunkan COD *outlet*/keluaran proses unit biologi di PT XYZ. Berdasarkan hal inilah, maka program *cleaner production* penting dilakukan untuk mengoptimalkan kinerja IPAL.

Analisis Setelah Dilakukannya *Cleaner production*

Hasil pengolahan SPSS memperlihatkan bahwa konsentrasi air limbah yang dihasilkan setelah pelaksanaan program *cleaner production* akan mempengaruhi kualitas air limbah pada *outlet* IPAL dan menentukan keberhasilan setiap rangkaian unit proses *end of pipe technology* yang ada. Apabila COD *input* IPAL rendah, maka COD hasil pengolahan unit IPAL juga menjadi lebih baik. Terlihat bahwa konsistensi pelaksanaan program *cleaner production* di area penghasil limbah perlu dijaga dan dikontrol setiap saat, sehingga air limbah yang masuk ke

IPAL dapat diolah secara optimal. Kinerja IPAL yang optimal diharapkan dapat menghasilkan keluaran air limbah yang memenuhi standar baku mutu.

Dua pasangan data yang tidak muncul setelah dilakukannya program *cleaner production* adalah korelasi volume *input* IPAL terhadap COD *input* IPAL dan korelasi volume *input* terhadap COD hasil pengolahan IPAL. Hal ini dapat terjadi dikarenakan ada jumlah minimal pengotor atau bahan kimia terlarut yang selalu terikut pada proses pencucian. Apabila pengurangan volume air limbah tidak lagi bisa diimbangi dengan pengurangan kadar bahan kimia yang terlarut pada air limbah, maka COD air limbah akan meningkat kembali. Perlu diperhatikan juga bahwa pengurangan volume air limbah di perusahaan yang berhubungan dengan proses pencucian juga mempunyai batas minimal. Batas minimal penggunaan air untuk proses pencucian ini dilakukan untuk memastikan peralatan bersih dan memenuhi standar "Cara Pembuatan Kosmetik yang Baik" (CPKB) atau standar *Good Manufacturing Practice* (GMP), yang tujuannya adalah untuk menghindari kontaminasi pada produk.

Tabel 1. Pasangan Data yang Mempunyai Korelasi yang Signifikan

No	Pasangan Data	Sebelum Pelaksanaan Program <i>Cleaner Production</i>		Setelah Pelaksanaan Program <i>Cleaner Production</i>	
		Sifat Korelasi	Interpretasi hasil Pengolahan SPSS	Sifat Korelasi	Interpretasi hasil Pengolahan SPSS
1	Nilai COD <i>inlet</i> IPAL dan COD pada bak <i>equalisasi</i> IPAL	Positif dan lemah	Ada faktor lain yang lebih mempengaruhi, yaitu pengkondisian pada bak <i>equalisasi</i>	Positif dan kuat	Penurunan COD <i>inlet</i> IPAL setelah optimalisasi pengkondisian bak <i>equalisasi</i> dan pelaksanaan program <i>cleaner production</i> , menentukan penurunan COD pada bak <i>equalisasi</i>
2	Nilai COD <i>inlet</i> IPAL dan COD hasil pengolahan unit kimia IPAL	Positif dan kuat	Kinerja dan hasil pengolahan <i>lamella</i> /unit kimia IPAL sangat ditentukan oleh nilai COD air limbah yang masuk ke dalam IPAL	Positif dan kuat	Kinerja dan hasil pengolahan <i>lamella</i> /unit kimia IPAL sangat ditentukan oleh nilai COD air limbah yang masuk ke dalam IPAL
3	Nilai COD <i>inlet</i> IPAL dan COD hasil pengolahan unit biologi IPAL	Positif dan lemah	Ada faktor lain yang lebih mempengaruhi penurunan COD <i>outlet</i> , yaitu COD hasil pengolahan unit kimia IPAL	Positif dan kuat	Pelaksanaan program <i>cleaner production</i> melalui penurunan COD <i>inlet</i> akan menentukan penurunan COD hasil pengolahan unit biologi IPAL dan kualitas pengolahan air limbah
4	Nilai COD pada bak <i>equalisasi</i> dan COD hasil pengolahan unit kimia IPAL	Positif dan kuat	Kinerja dan hasil pengolahan unit kimia IPAL sangat ditentukan oleh nilai COD air limbah yang ditampung pada bak <i>equalisasi</i>	Positif dan kuat	Kinerja dan hasil pengolahan unit kimia IPAL sangat ditentukan oleh nilai COD air limbah yang ditampung pada bak <i>equalisasi</i>
5	Nilai COD pada bak <i>equalisasi</i> dan COD hasil pengolahan unit biologi IPAL	Positif dan lemah	Ada faktor lain yang paling mempengaruhi unit biologi, yaitu hasil pengolahan unit kimia	Positif dan kuat	Konsentrasi COD bak <i>equalisasi</i> mempunyai COD yang hampir sama dengan COD air limbah yang masuk ke IPAL. Dengan demikian, hubungan korelasi yang kuat dari COD <i>inlet</i> akan terus berlanjut.

6	Nilai COD hasil pengolahan unit kimia IPAL dan COD hasil pengolahan unit biologi IPAL	Positif dan kuat	Pengolahan biologi akan semakin efektif dan mudah apabila pengolahan sebelumnya pada pengolahan kimia IPAL berjalan baik	Positif dan lemah	Lemahnya korelasi terjadi karena adanya batasan kemampuan <i>design</i> peralatan/ <i>lamella</i> pada unit pengolahan kimia IPAL setelah dilakukannya optimalisasi alat dan penggunaan bahan kimia yang diikuti dengan program <i>cleaner production</i>
7	Volume <i>inlet</i> air limbah dan nilai COD <i>inlet</i> IPAL	Negatif dan lemah	Semakin kecil volume air limbah, semakin besar COD-nya. Korelasinya bersifat lemah, karena ada faktor lain yang lebih mempengaruhi COD air limbah, yaitu kadar atau konsentrasi bahan kimia yang terlarut pada air limbah. Apabila volume air limbah dikurangi sejalan dengan pengurangan kadar bahan kimia yang terlarut pada air limbah, maka COD air limbah mungkin saja nilainya tetap	—	—
8	Volume <i>inlet</i> air limbah dan nilai COD pada bak <i>equalisasi</i>	Negatif dan lemah	Ada faktor lain yang ikut mempengaruhi COD pada bak <i>equalisasi</i> , yaitu COD air limbah <i>inlet</i> yang masuk ke IPAL	Negatif dan lemah	Ada faktor lain yang lebih mempengaruhi COD air limbah, yaitu kadar atau konsentrasi bahan kimia yang terlarut pada air limbah. Setelah program <i>cleaner production</i> dilakukan, volume air limbah dikurangi sejalan dengan pengurangan kadar bahan kimia yang terlarut pada air limbah, sehingga COD air limbah mungkin saja nilainya tetap
9	Volume <i>inlet</i> air limbah dan nilai COD yang keluar pada unit pengolahan kimia IPAL	Negatif dan lemah	Ada faktor lain yang lebih mempengaruhi COD keluaran unit kimia, yaitu COD air limbah <i>inlet</i> yang masuk ke IPAL	—	—

Analisis terhadap Upaya yang Dilakukan untuk Mendukung Keberhasilan Program *Cleaner Production*

Kandungan COD dan volume air limbah yang masuk ke dalam bak *equalisasi* IPAL diturunkan dengan melakukan program *cleaner production*. Awal bulan Mei 2014, PT XYZ melakukan pemetaan limbah cair yang berasal dari semua area. Program ini, melalui 3 (tiga) cara, yaitu: 1) Perbaikan dan peningkatan peralatan/teknologi, serta optimalisasi proses produksi; 2) Perbaikan cara kerja atau yang biasa dikenal dengan *Ways of Working* (WOW); 3) Melakukan sosialisasi, penyuluhan, dan pelatihan mengenai pengelolaan limbah cair.

Perbaikan dan Peningkatan Peralatan / Teknologi, serta Optimalisasi Proses Produksi

Upaya peningkatan teknologi dan fasilitas fisik di area produksi dilakukan dalam rangka untuk mengurangi beban dan konsentrasi air limbah yang masuk ke IPAL. Upaya ini antara lain dilakukan dengan:

1. Melakukan otomatisasi proses pencucian dari manual ke otomatis untuk beberapa mesin di area manufaktur dengan metoda *cleaning in place* (CIP), yaitu metode pencucian di tempat untuk proses pencucian sistem pemipaan, tangki penampungan maupun peralatan proses lainnya dengan tidak melakukan pembongkaran. Proses pencucian terutama dilakukan pada saat *Change Over Product* (COP). Otomatisasi proses pencucian saat COP akan menjadi lebih efisien dari segi waktu maupun pengontrolan volume air yang digunakan.
2. Melakukan perbaikan beberapa titik kebocoran yang ada di area manufaktur (*mixing process*). Titik kebocoran ini berada pada jaket *mixer*, sehingga air *cooling tower* yang digunakan untuk pendinginan produk selalu tumpah dan masuk ke saluran penampungan yang dialirkan ke IPAL. Volume air limbah dari area manufaktur (*mixing process*) yang masuk ke IPAL dapat berkurang dengan melakukan perbaikan fasilitas fisik di area ini.

3. Melakukan modifikasi pada mesin *filler* yang ada di *line* produksi, agar sisa produk pada akhir proses pengisian ke botol/proses *filling* dapat dikembalikan ke tangki penampungan di area manufaktur (*mixing process*). Produk yang dikembalikan ke area manufaktur (*mixing process*) dapat digunakan kembali menjadi campuran produk berikutnya dengan komposisi pencampuran yang telah divalidasi sebelumnya.
4. Mengubah proses manufaktur dari proses panas ke proses dingin sehingga tidak diperlukan proses pendinginan, sehingga tidak ada sumber kebocoran air, yang mengalir ke IPAL dan sekaligus menghematan energi.
5. Mengubah prosedur pencucian saat penggantian produk/*Change Over Product* (COP) di area manufaktur, dengan cara pelaksanaan sistem *Push Product on Product* (PPOP). Pada tahap produksi, pelaksanaan sistem PPOP merupakan salah satu cara mengurangi beban dan konsentrasi air limbah dengan tidak melakukan pencucian. Pencucian mesin tidak dilakukan jika mesin atau *line* manufaktur memproduksi produk yang sama ataupun produk dengan perubahan gradasi warna terang ke warna yang lebih gelap. Proses PPOP yang dilakukan di PT XYZ ini mendukung teori yang ada [11], yang menjelaskan bahwa produksi bersih pada proses produksi akan lebih efektif jika difokuskan pada perbaikan proses penggantian produk.

Perbaikan Cara Kerja

Beberapa upaya yang telah dilakukan oleh PT XYZ untuk mengurangi COD dan volume air limbah yang masuk ke IPAL adalah:

1. Melakukan pemetaan dan validasi sumber air limbah. Berdasarkan pemetaan tersebut, diketahui bahwa limbah dari laboratorium QC termasuk dalam tiga penyumbang nilai COD tertinggi. Oleh karenanya limbah dari QC tersebut nantinya akan dipisahkan dan dikeluarkan melalui pihak ketiga. Selain itu, manufaktur (*mixing process*) menjadi area penyumbang volume limbah cair yang paling banyak. Sehingga dijadikan fokus area untuk pelaksanaan *cleaner production*;
2. Mengurangi volume dan konsentrasi air limbah. Beberapa upaya yang dilakukan adalah:
 - a) Dengan melakukan penanganan sisa produk atau material konsentrat yang tidak terpakai. Sisa produk atau material konsentrat yang masih layak pakai tetapi tidak memenuhi spesifikasi untuk dijadikan produk, dipisahkan dan dikumpulkan ke dalam wadah khusus, selanjutnya dijual kepada pemanfaat;
 - b) Mengurangi beban, konsentrasi, dan volume air untuk pencucian mesin. Upaya ini dilakukan mulai dari tahap perencanaan sampai dengan proses produksi.

Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Upaya Mengurangi Beban dan Konsentrasi Air Limbah dari Pencucian Mesin

No	Tahapan	Strategi	Upaya yang Dilakukan
1	Tahap Perencanaan	Membuat matriks <i>planning</i>	1. Menyusun <i>planning</i> yang efisien untuk produksi 2. Membuat batasan maksimum jumlah pergantian produk perhari
		Melakukan revisi untuk beberapa <i>batch card</i> /formula produk	Membuat <i>common base</i> /produk dasar yang sama untuk beberapa produk
2	Tahap Produksi	Membakukan prosedur pencucian saat penggantian produk/ <i>Change Over Product</i> (COP) di area manufaktur	Revisi prosedur pencucian alat saat penggantian produk

Matriks *planning* menjadi acuan bagian produksi untuk membuat produk. Semakin sedikit pergantian produk, semakin sedikit proses pencucian yang dilakukan, semakin sedikit material atau produk sisa yang terbuang, dan semakin sedikit pula waktu yang hilang untuk menghasilkan produk. Pada akhirnya, produktivitas produksi akan semakin meningkat.

Melakukan Sosialisasi, Penyuluhan, dan Pelatihan Mengenai Pengelolaan Limbah Cair

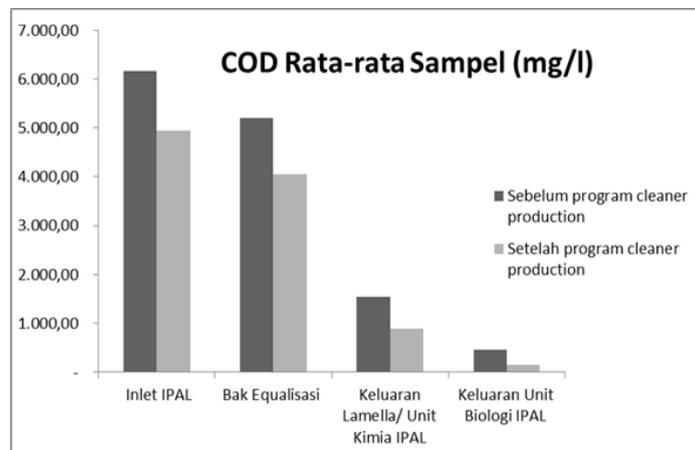
Perusahaan PT XYZ sudah mempunyai komitmen yang baik dalam pengelolaan lingkungan yang dituangkan dalam kebijakan perusahaan terkait dengan lingkungan. Kebijakan lingkungan yang dimiliki memang masih bersifat umum, namun sudah diturunkan ke dalam sebuah *master plan* yang lengkap. Acuan yang digunakan adalah panduan dari group yang merupakan target dari *shareholder* atau pemegang saham ditingkat global untuk melaksanakan salah satu program CSR (*Corporate Social Responsibility*) dibidang lingkungan untuk meminimalkan dampak negatif dari kegiatan industrinya. Komunikasi kepada pihak internal perusahaan untuk kebijakan perusahaan terkait lingkungan ini sudah dilakukan kepada semua karyawan, mulai dari level manajemen sampai level pekerja umum.

D. Manfaat Pelaksanaan Program *Cleaner production* pada Kinerja IPAL

Perbandingan rata-rata untuk data sampel yang diambil setelah dilakukannya program *cleaner production*, memperlihatkan hasil pengolahan IPAL yang lebih baik. Berdasarkan paparan sebelumnya, diketahui bahwa PT XYZ menghadapi masalah pada pengolahan air

limbahnya. Hasil air limbah yang diolah dan keluar dari IPAL seringkali melampaui baku mutu yang dipersyaratkan. Air limbah yang dihasilkan sebagian besar berasal dari proses pencucian pada unit produksi, khususnya dari area *line* manufaktur (*mixing process*) yang menyumbangkan 73% beban kandungan bahan kimia ke dalam IPAL. Untuk mengurangi beban dan mengoptimalkan kinerja IPAL, PT XYZ melakukan program *cleaner production*. Berdasarkan data sampel yang diambil oleh peneliti, terlihat adanya perubahan dan manfaat positif dari pelaksanaan program *cleaner production*. Volume air limbah sampel rata-rata harian yang diambil menunjukkan penurunan dari 98,93 m³ menjadi 54,77 m³ setelah program *cleaner production* berlangsung. Demikian juga dengan nilai COD air limbah yang memperlihatkan penurunan jika dibandingkan antara sebelum dan sesudah pelaksanaan program *cleaner production*, seperti yang terlihat pada Gambar 2. Nilai COD inlet IPAL turun dari 6161,83 mg/l menjadi 4936,14 mg/l; COD pada bak *equalisasi*, dari 5193,89 mg/l turun menjadi 4045,13 mg/l; keluaran *lamella*/unit pengolahan kimia IPAL juga menjadi lebih baik, dari 1538,62 mg/l turun menjadi 891,45 mg/l setelah program *cleaner production*.

Hasil pengolahan IPAL yang sebelumnya melampaui baku mutu yang dipersyaratkan, yaitu rata-rata 458,70 mg/l turun menjadi 153,22 mg/l atau sebesar 67% setelah pelaksanaan program *cleaner production*. Kecenderungan yang diamati dari data hasil keluaran unit pengolahan biologi IPAL setelah program *cleaner production* memenuhi standar baku mutu yang ditetapkan sesuai dengan Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah.

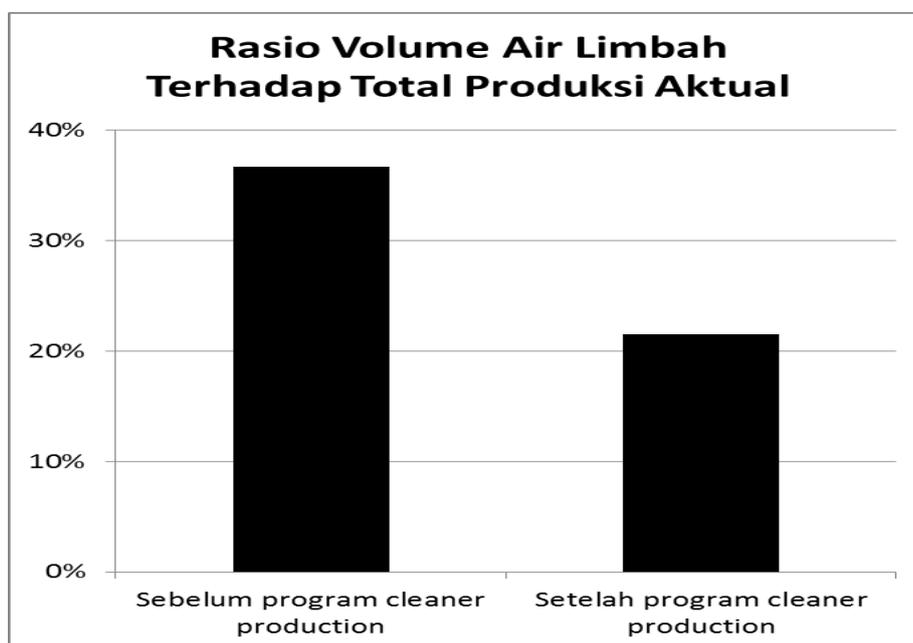


Gambar 2. Perbandingan COD Rata-rata Sampel Sebelum dan Sesudah Dilakukannya Program *Cleaner Production*

Hasil pengolahan data memperlihatkan adanya korelasi yang kuat dan signifikan untuk COD air limbah yang masuk ke dalam IPAL dengan COD air limbah yang keluar dari unit pengolahan kimia IPAL dan kualitas air limbah yang dihasilkan dari *outlet* IPAL. Semakin kecil COD dan volume yang terkandung pada air limbah, semakin baik juga optimalisasi kinerja IPAL dan semakin baik juga kualitas air limbah yang keluar dari unit pengolahan biologi.

Selanjutnya Gambar 3 dibuat untuk memperlihatkan adanya rasio penurunan volume

rata-rata air limbah yang dihasilkan terhadap total produksi di PT XYZ. Perbandingan terhadap total produksi ini perlu dilakukan, karena PT XYZ menghasilkan produk yang bermacam-macam, dan membutuhkan adanya pencucian mesin disetiap pergantian produk. Artinya, kenaikan total produksi akan menyebabkan kenaikan volume air limbah. Hasil perhitungan memperlihatkan bahwa rasio volume air limbah terhadap volume produksi cenderung menurun setelah dilakukannya program *cleaner production*.



Gambar 3. Perbandingan Volume Rata-rata Air Limbah Sebelum dan Sesudah Dilakukannya Program *Cleaner Production*

Secara umum jika dihubungkan dengan rumus pengenceran, diketahui bahwa semakin sedikit volume air limbah yang dihasilkan, semakin meningkat pula konsentrasi air limbahnya. Oleh karena itu, penurunan volume air limbah di PT XYZ harus dilakukan sejalan dengan penurunan kandungan bahan kimia atau konsentrasi air limbahnya. Penurunan volume dan konsentrasi air limbah ini sangat tepat dilakukan dalam rangka menjalankan program *cleaner production*. Kedua hal ini akan memberikan manfaat positif kepada IPAL, yaitu mempermudah proses pengolahan dan pengoperasian IPAL.

E. Analisis Biaya Pengelolaan IPAL

Upaya *cleaner production* ini tidak hanya bermanfaat untuk mengurangi beban IPAL, tetapi juga berdampak pada penghematan biaya pengolahan air limbah. Dengan dikurangnya beban IPAL, proses pengolahan IPAL menjadi lebih baik, hasil olahan IPAL memenuhi baku mutu secara konsisten, perusahaan akan terhindar dari protes masyarakat sekitar, perusahaan tidak akan mendapatkan teguran/sanksi dari pemerintah, sehingga operasional perusahaan tidak terganggu. Artinya, biaya eksternal dapat dihindari dengan melakukan pengelolaan air limbah yang baik, sehingga dampak negatif dapat dihindari [13].

Selain mengurangi biaya eksternal, upaya *cleaner production* dapat menurunkan beban dan konsentrasi limbah sehingga biaya pengolahannya berkurang. Artinya, upaya *cleaner production* dapat mengurangi beban atau biaya pengeluaran perusahaan yang tidak perlu. Penurunan biaya ini dapat menaikkan keuntungan perusahaan, sehingga pada akhirnya meningkatkan daya saing perusahaan dengan perusahaan sejenis. Biaya pengelolaan air limbah terdiri atas biaya langsung dan tidak langsung. Namun peneliti hanya akan menganalisis melihat biaya langsung yang dibutuhkan.

Biaya Langsung Pengolahan Air Limbah

Biaya langsung adalah biaya yang dikeluarkan oleh perusahaan untuk mengoperasikan IPAL dengan mengolah 1 m³ air limbah. Biaya langsung yang dihitung di PT XYZ terdiri atas: a) Biaya pemakaian bahan kimia; b) Biaya pengelolaan *sludge* IPAL; c) Biaya operator yang mengelola IPAL.

Berdasarkan data resmi perusahaan, diperoleh informasi mengenai biaya pemakaian

bahan kimia sebelum dan sesudah dilakukannya program *cleaner production*. Semakin rendah konsentrasi COD air limbah yang akan diolah, semakin sedikit juga penggunaan bahan kimia yang dibutuhkan. COD air limbah yang diambil adalah COD air limbah pada bak equalisasi yang akan diolah di unit kimia IPAL.

Biaya pengelolaan *sludge* IPAL bersifat tetap, karena harganya ditentukan oleh pihak eksternal. Dengan penurunan volume air limbah, *sludge* yang dihasilkan juga akan berkurang. Berdasarkan data dari perusahaan, *sludge* IPAL yang dihasilkan berjumlah 3% dari air limbah yang diolah atau setiap 33,3 m³ air limbah yang diolah, akan menghasilkan 1 ton *sludge*. Asumsi yang digunakan untuk memudahkan perhitungan adalah berat jenis air limbah dianggap sama dengan air.

Biaya operator yang mengelola IPAL juga bersifat tetap, karena tidak akan berubah dengan penurunan volume maupun kadar COD air limbah. Total perbandingan biaya pengolahan air limbah berdasarkan COD di IPAL dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Perhitungan Biaya Langsung IPAL untuk Pengolahan Air Limbah per-m³

	Sebelum Program <i>Cleaner production</i>	Setelah Program <i>Cleaner production</i>
COD bak <i>equalisasi</i> (mg/l)	5193,89	4045,13
Biaya pemakaian bahan kimia per-m ³ limbah yang diolah (Rp)	68.805	42.643
Biaya pengelolaan <i>sludge</i> IPAL per-m ³ limbah yang diolah (Rp)	31.588	31.588
Biaya operator (Rp)	22.497	22.497
Total Biaya Langsung per-m³ (Rp)	122.890	96.728

(Sumber: Hasil Survei, 2015)

Berdasarkan Tabel 3 diketahui persentase penurunan biaya langsung pengoperasian IPAL berdasarkan penurunan beban/konsentrasi COD air limbah yang diolah adalah sebesar 21% untuk per m³ air limbah yang diolah. Artinya, perusahaan mendapatkan penghematan biaya pengolahan air limbah sebesar 21% untuk setiap air limbah yang diolah dengan melakukan program *cleaner production*.

F. Rasio Eko-efisiensi

Rasio eko-efisiensi yang dihitung oleh peneliti merupakan rasio pengaruh kinerja terhadap lingkungan. Unsur penyusun komponen nilai eko-efisiensi ini dihitung dari data beban *input* sumber daya pada penelitian ini, berupa volume air yang digunakan. Rumus yang digunakan adalah [14]:

$$\text{Rasio Eko - efisiensi} = \frac{\text{Produk yang dihasilkan}}{\text{Air yang Digunakan}} \dots\dots\dots (1)$$

Tabel 4 menunjukkan bahwa ada peningkatan rasio eko-efisiensi untuk penggunaan air, setelah dilaksanakannya program *cleaner production* di area produksi. Rasio eko-efisiensi naik sebesar 2%, dari 0,55 menjadi 0,56. Nilai 0,56 berarti bahwa perusahaan dapat menghasilkan 0,56 m³ produk dari tiap 1 m³ air yang digunakan. Nilai ini masih belum optimal, jika dibandingkan dengan nilai standar rasio eko-efisiensi untuk penggunaan air di perusahaan sejenis dengan PT XYZ, yaitu rasionya bernilai 1 (satu). Nilai standar 1 merupakan kontribusi dari :

- a. Rata-rata kandungan air pada produk sejenis seperti di PT XYZ adalah 70%.
- b. Selain air untuk bahan baku, pembuatan produk membutuhkan air untuk pencucian peralatan produksi dan kebutuhan *utility* sekitar 30% dari volume produk yang dihasilkan.

Berdasarkan kebutuhan air tersebut, dapat diketahui bahwa seharusnya 1 m³ produk di PT XYZ dapat dibuat dari 0,7 m³ air baku untuk produk dan 0,3 m³ air untuk proses penunjang.

Tabel 4. Perhitungan Rasio Eko-efisiensi

Kondisi	Rata-rata Produksi Perhari (m ³)	Rata-rata Penggunaan Air Perhari (m ³)	Rasio Eko-efisiensi
Sebelum program <i>cleaner production</i>	269,61	492,03	0,55
Setelah program <i>cleaner production</i>	254,80	458,12	0,56

(Sumber: Hasil Penelitian, 2015. Telah diolah kembali)

Nilai rasio eko-efisiensi dari kinerja lingkungan yang bernilai <1 ini mengindikasikan bahwa *cleaner production* dalam hal penghematan penggunaan air di PT XYZ belum maksimal. Peneliti melihat bahwa perusahaan baru fokus pada upaya pelaksanaan program *cleaner production* untuk mengurangi timbulan air limbah dari area produksi saja.

G. Tingkat Pengetahuan, Sikap, dan Perilaku Pekerja dalam Pelaksanaan Program Cleaner Production

Tingkat rata-rata pengetahuan, sikap, dan perilaku untuk level manajemen dan operator saat ini diketahui sudah sangat baik. Nilai untuk level manajemen dan level operator berturut-turut adalah: tingkat pengetahuan sebesar 89% dan 76%; tingkat sikap sebesar 89% dan 79%; tingkat perilaku sebesar 94% dan 76%. Pengetahuan, sikap, dan perilaku pekerja PT XYZ sangat baik pada kondisi telah diterapkannya program *cleaner production* di area produksi dan optimalisasi kinerja IPAL. Hal ini memperkuat pendapat yang mengatakan bahwa pengetahuan, sikap, dan perilaku dari

pekerja dapat mempengaruhi keberhasilan suatu program yang dilakukan oleh perusahaan [11].

Ada kecenderungan nilai pengetahuan lebih rendah atau sama dengan nilai sikap dan perilaku. Peneliti mencoba untuk melakukan pengamatan langsung dan mengumpulkan informasi di lapangan. Peneliti menduga masih banyak perilaku yang dilakukan oleh pekerja lebih karena paksaan atau dorongan yang sifatnya dari atasan ke bawahan (*top to down*). Perilaku seperti ini belum tentu bertahan lama dan konsisten, sehingga perlu lebih ditingkatkan upaya berupa diskusi, partisipasi, maupun pemberian informasi kepada karyawan [15]. Diharapkan program *cleaner production* benar-benar dapat menjadi budaya dan nilai yang tertanam pada setiap karyawan di PT XYZ.

Secara umum, program *cleaner production* yang dilakukan oleh PT XYZ ini juga mendukung beberapa dari 17 tujuan global yang diharapkan dari *Sustainable Development Goals* (SDGs), antara lain:

- a. Tujuan nomor enam dari SDGs, yaitu air bersih dan sanitasi.

Dengan naiknya rasio eko-efisiensi penggunaan air, artinya perusahaan telah berusaha untuk menjamin ketersediaan air bersih dan sanitasi yang berkelanjutan.

- b. Tujuan nomor dua belas dari SDGs, yaitu konsumsi dan produksi bertanggung jawab.

Dengan melakukan program *cleaner production*, maka perusahaan telah melakukan pola produksi yang baik. Walaupun PT XYZ belum menerapkan konsep *eco-labelling* secara menyeluruh pada semua produknya, namun dengan upaya pengurangan limbah dari sumbernya yang dilakukan melalui perbaikan proses produksi, dapat memberikan jaminan kualitas produk kepada konsumennya. Selain itu, penerapan *cleaner production* di PT XYZ juga memberikan manfaat positif tidak hanya bagi perusahaan, tetapi juga bagi lingkungan sekitar. Hal ini menolak pendapat yang menyatakan bahwa upaya yang dilakukan oleh industri untuk mengatasi dampak negatif terhadap lingkungan lebih mengarah kepada upaya menghilangkan sebanyak mungkin limbah dari lokasi pabrik tanpa mepedulikan bentuk akhir dari limbah tersebut di luar pabrik [16].

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa:

1. Pelaksanaan program *cleaner production* di area produksi dapat mengoptimalkan kinerja IPAL, sehingga *outlet* IPAL memenuhi baku mutu.
2. Tingkat rata-rata pengetahuan, sikap, dan perilaku untuk level manajemen dan operator di PT XYZ dalam pelaksanaan program *cleaner production* di area produksi saat ini sudah sangat baik.
3. Melalui pelaksanaan program *cleaner production* di area produksi dan optimalisasi kinerja IPAL, biaya langsung untuk pengolahan air limbah di PT XYZ menurun sebesar 21% untuk per m³-nya berdasarkan penurunan beban COD.
4. Rasio eko-efisiensi di PT XYZ meningkat sebesar 2% dengan pelaksanaan program *cleaner production*.

Secara umum disimpulkan bahwa PT XYZ yang merupakan industri sabun, kosmetik, dan bahan pembersih rumah tangga, dapat melakukan optimalisasi pengolahan air limbah di IPAL melalui program *cleaner production* di area

produksi. Selanjutnya pengurangan biaya pengolahan air limbah dan kenaikan rasio eko-efisiensi dari penggunaan air dapat diperoleh dengan dukungan dari pekerja yang mempunyai tingkat pengetahuan, sikap, dan perilaku yang sangat baik.

SARAN

Berdasarkan hasil pembahasan, keterbatasan, dan kesimpulan penelitian, maka disarankan beberapa hal berikut:

1. Program *cleaner production* sebaiknya diterapkan untuk semua area, tidak hanya di area produksi, namun juga untuk bagian *utility*, *office*, dan area pendukung lainnya.
2. *Cleaner production* belum menjadi istilah yang umum untuk karyawan di PT XYZ. Sebagian besar responden sudah melakukannya, namun mereka tidak menyadari bahwa upaya yang telah dilakukan tersebut merupakan bagian dari program *cleaner production*. Manajemen yang bertanggung jawab terhadap lingkungan perlu melakukan upaya yang lebih intensif terkait program kampanye lingkungan. Perlu adanya sosialisasi mengenai semua program perusahaan terkait lingkungan, terutama untuk program *cleaner production* sampai ke level yang paling bawah dengan bahasa yang sederhana, sehingga mudah dimengerti dan dipahami.
3. Pengusaha perlu mengkaji potensi untuk melakukan *recycle* air limbah untuk keperluan *utility*, sehingga dapat mengurangi biaya dan sekaligus melakukan upaya menghemat sumber daya air.
4. Perusahaan sebaiknya membuat revisi untuk neraca air yang ada secara lebih detail. Hal ini diperlukan agar perusahaan bisa memantau dan melihat potensi pengurangan penggunaan air di masa mendatang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Mahaesa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, penulis dapat menyelesaikan tesis ini. Penulisan tesis ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Magister Sains Ilmu Lingkungan program studi Ilmu Lingkungan pada program Pascasarjana Universitas Indonesia. Penulis menyadari bahwa,

tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan tesis ini, sangatlah sulit bagi penulis untuk menyelesaikan tesis ini. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. dr. Tri Edhi Budhi Soesilo, M.Si., sebagai ketua Program Studi Ilmu Lingkungan dan selaku Pembimbing II yang telah memberikan bimbingan, bantuan, nasihat, motivasi, dan petunjuk dalam penyusunan tesis ini;
2. Ibu Prof. Dr. Ir. Roekmijati Widaningroem Soemantojo, M.Si., selaku pembimbing I yang telah banyak memberikan bimbingan, nasihat, dan arahan untuk menyelesaikan tesis ini;
3. Ibu Dr. Hayati Sari Hasibuan, ST, MT., selaku sekretaris Program Studi Ilmu Lingkungan beserta seluruh staf administrasi dan akademik Program Studi Ilmu Lingkungan, Program Pascasarjana, Universitas Indonesia yang telah membantu kelancaran penulis semasa studi (*Mas Azhar, Mbak Wezia, Mbak Pricil, Mbak Pipit, Mas Juju, Mbak Sri, Mas Nasrullah dan Ibu Irna*);
4. Pihak PT XYZ, yang telah membantu dalam usaha memperoleh data yang penulis perlukan;
5. Kepada suami tercinta Rendra Kurniawan, ST, anak-anakku tersayang, Rafi Yudha Wirawan dan Rifqaila Yasmin Thufailah, serta orangtua tercinta yang telah banyak memberikan semangat, cinta, dorongan, doa, bantuan, serta pengertian atas waktu yang terbagi untuk kuliah;
6. Bapak Ir. Erie Hartono, MM., selaku atasan yang telah meluangkan waktu untuk berdiskusi, memberikan bantuan, nasihat, dorongan, dan masukan yang membangun;
7. Teman-teman Angkatan 33A khusus, Angkatan 32B khusus, Angkatan 33B khusus yang telah memberikan dukungan moral;
8. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan tesis ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. Zulkifli, A. (2014). *Pengelolaan Limbah Berkelanjutan*. Cetakan Pertama. Jakarta: Graha Ilmu.
2. Durai, D. C., & Singaravelu, K. (2013). Rural Consumer Behaviour on Fast Moving Consumer Goods. *International Journal of Development Research*, 3, 073-075.
3. KLH. (2014). Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah. Jakarta.
4. Miller Jr., & Spoolman, S. E. (2012). *Living in the Environment*. Seventeenth Edition. USA: Brooks/Cole, Cengage Learning.
5. Capra dalam Keraf, A. S. (2014). *Filsafat Lingkungan Hidup, Alam Sebagai Sebuah Sistem Kehidupan, Bersama Fritjof Capra*. Cetakan Pertama. Yogyakarta: Kanisius.
6. Soemarwoto, O. (2004). *Ekologi, Lingkungan Hidup dan Pembangunan*. Edisi Kesepuluh. Jakarta: Djambatan.
7. Mol and Gee, 1999 dalam Levidow, L., Jorgensen, P. L., Nilsson, A., Skenhall, S. A., & Assimacopoulos, D. (2015). Process Eco-Innovation: Assessing Meso-Level Eco-Efficiency in Industrial Water-Service System. *Journal of Cleaner production*, xxx, 1-12.
8. BAPEDAL, 1995 dalam Soemantojo, R.W. (1997). *Pengelolaan Limbah*. Diklat Penyelenggaraan Pendidikan Percepatan Insinyur Program Studi Teknik Gas dan Petrokimia. Jakarta: Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.
9. Environmental Protection Agency. (1997). *Waste Water Treatment Manuals, Primary, Secondary and Tertiary Treatment*. Ireland: Environmental Protection Agency Agency.
10. Eckenfelder Jr., W. W. (2000). *Industrial Water Pollution Control*. Third edition. California: McGraw-Hill, Inc.
11. Berkel, R. van. (2007). Cleaner production and Eco-Efficiency Initiatives in Western Australia 1996-2004. *Journal of Cleaner production*, 15, 741-755.
12. Widiyani, P. (2010). *Dampak dan Penanganan Limbah Deterjen*. Skripsi. Bogor: Program Studi Kesehatan Masyarakat, Fakultas Kedokteran Hewan, Institut Pertanian Bogor.
13. Suparmoko, M., dan Irawan, M. (2014). *Ekonomika Pembangunan*. Edisi Keenam, Cetakan Kelima. Yogyakarta: BPF.
14. Verfaillie, H. A., and Bidwell, R. (2000). *Measuring Eco-efficiency, A Guide to Reporting Company Performance*. First Edition: World Business Council for Sustainable Development
15. Pruss, Giroult, & Rushbrook, 1999 dalam Maharani, Z. (2012). *Kajian Pengelolaan dan Minimasi Limbah Padat Non Medis Rumah Sakit Dr. Cipto Mangunkusumo*

Jakarta. Tesis. Program Studi Ilmu Lingkungan, Program Pasca Sarjana Universitas Indonesia, Jakarta.

16. Dadang, B. M. (2005). *Pengembangan Eko-Industrial Sebagai Alternatif Pengelolaan Lingkungan Industri. Tesis. Jakarta: Program Studi Ilmu Lingkungan.*

PENGOLAHAN LIMBAH METHYLEN BLUE SECARA FOTOKATALISIS TiO₂ DENGAN PENAMBAHAN Fe DAN ZEOLIT

Agus Salim Afrozi, Rahmat Salam, Auring R, Asep Nana S
Pusat Sains dan Teknologi Bahan Maju – BATAN
Kawasan Puspiptek Serpong – Tangerang Selatan
Email: agussal@batan.go.id

ABSTRAK

PENGOLAHAN LIMBAH METHYLEN BLUE SECARA FOTOKATALISIS TiO₂ DENGAN PENAMBAHAN Fe DAN ZEOLIT. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh penambahan Fe dan zeolit terhadap aktivitas fotokatalis TiO₂ dalam pengolahan limbah methylen blue. TiO₂ yang digunakan adalah TiO₂ teknis, prekursor Fe adalah Fe(NO₃)₃·9H₂O, zeolit yang digunakan adalah zeolit Bayah. Penambahan dopan Fe dilakukan dengan cara impregnasi. Komposisi Fe dalam katalis adalah 3% berat TiO₂, penambahan zeolit dilakukan dengan variasi perbandingan berat TiO₂ dan zeolit 1:1, 1:2 dan 1:3 menggunakan metode impregnasi. Hasil karakterisasi Difraktometer X-Ray menunjukkan penambahan Fe dan zeolit pada TiO₂ tidak mempengaruhi ukuran kristal yaitu dalam kisaran 20 s/d 40 nm. Hasil karakterisasi SEM-EDS terlihat bahwa penambahan dopan Fe dan zeolit tertinggi diperoleh pada penambahan zeolit dengan perbandingan berat TiO₂ dan zeolit 1:3. Hasil karakterisasi BET menunjukkan luas permukaan TiO₂ mengalami kenaikan yang cukup tinggi dengan penambahan Fe dan zeolit. Hasil pengujian menunjukkan penambahan Fe dan zeolit meningkatkan aktivitas fotokatalis TiO₂ dalam mendegradasi methylen blue dari konstanta laju reaksi TiO₂ 0,160 jam⁻¹ menjadi 0,524 jam⁻¹ untuk penambahan zeolit 1:1, menjadi 0,632 jam⁻¹ untuk penambahan zeolit 1:2 dan menjadi 0,495 jam⁻¹ untuk penambahan zeolit 1:3. Peningkatan tertinggi diperoleh pada penambahan zeolit 1:2.

Kata Kunci : fotokatalis; methylen blue; TiO₂ , Fe/TiO₂-Zeolit.

ABSTRACT

METHYLEN BLUE WASTE TREATMENT BY TiO₂ PHOTOCATALYTIC ADDED WITH WITH Fe AND ZEOLIT. The purpose of this study was to observe the effect of zeolite on the activity of Fe and TiO₂ photocatalyst in methylene blue waste treatment. TiO₂ used was a technical TiO₂, Fe precursor is Fe(NO₃)₃·9H₂O zeolite used is zeolite bayah. The addition of dopants Fe is done by means of impregnation. Fe in the catalyst composition is 3 wt% TiO₂, adding zeolite was done by varying the weight ratio of TiO₂ and zeolite 1: 1, 1: 2 and 1: 3 using impregnation method. The results of X-ray diffraction characterization showed the addition of Fe and TiO₂ zeolite does not affect the crystal size is in the range of 20 to 40 nm. SEM-EDS characterization results shown that the addition of dopants Fe and zeolite highest obtained in addition to weight ratio TiO₂ and zeolite 1: 3. Result of characterization BET surface area of TiO₂ show experienced a high increase with the addition of Fe and zeolite. The test results showed the addition of Fe and the zeolite increases the activity of photocatalytic TiO₂ in degrading methylene blue on the reaction rate constant TiO₂ 0.160 h⁻¹ to 0.524 h⁻¹ for the addition of zeolite 1: 1, being 0.632 h⁻¹ for the addition of zeolite 1: 2 and became 0.495 h⁻¹ for the addition of zeolite 1: 3. The highest increase was obtained on the addition of zeolite 1: 2.

Keywords : Photocatalyst ; methylene blue; TiO₂ , Fe/TiO₂-Zeolit

PENDAHULUAN

Limbah merupakan produk samping dari proses industri. Limbah cair yang dikeluarkan oleh industri tekstil mengandung berbagai zat pewarna yang berbahaya bagi lingkungan, misalnya golongan azo di mana zat warna tersebut memiliki sifat *non-biodegradable* [1]. Disamping menimbulkan bau tak sedap, perombakan zat warna secara anaerob pada dasar perairan menghasilkan senyawa amina aromatik yang lebih toksik dibandingkan dengan zat warna semula [2]. Oleh karena itu, usaha untuk mengatasi masalah tersebut harus dilakukan sedini mungkin.

Metode-metode penanggulangan limbah yang sering dilakukan adalah metode adsorpsi, biodegradasi, serta metode kimia seperti klorinasi

dan ozonisasi. Metode-metode tersebut cukup efektif dalam menanggulangi limbah namun memerlukan biaya operasional yang sangat besar. Masih banyak juga metode-metode lain yang biasa digunakan, seperti koagulasi kombinasi, oksidasi elektrokimia, flokulasi, osmosis balik, dan adsorpsi menggunakan karbon aktif. Namun, metode-metode tersebut juga memiliki banyak kelemahan yaitu munculnya masalah baru seperti dihasilkannya fasa baru yang mengandung polutan yang lebih terkonsentrasi [3].

Metode fotokatalisis dengan menggunakan TiO₂ memiliki banyak kelebihan diantaranya adalah mudah didapat, harga relatif murah, tidak berbahaya, dan stabil secara kimia [4]. Salah satu kelemahan TiO₂ adalah hanya aktif pada rentang sinar uv untuk menginisiasi proses fotokatalitik. Berbagai upaya untuk

meningkatkan aktivitas fotokatalitik TiO_2 dan menggeser daerah kerja TiO_2 telah banyak dilakukan, diantaranya dengan penambahan dopan logam maupun non logam.

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan Andarini [5] dan Ramadhana [6] aktivitas fotokatalis TiO_2 juga dapat ditingkatkan melalui pengembanan pada material pendukung, seperti adsorben. Salah satu adsorben yang dapat digunakan adalah zeolit alam yang mempunyai pori dan luas permukaan yang relatif besar [7]. Sementara itu, Indonesia merupakan negara dengan sumber daya alam mineral zeolit yang melimpah. Namun, mineral zeolit tersebut belum dimanfaatkan secara optimal [8].

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh penambahan Fe dan zeolit terhadap aktivitas fotokatalis TiO_2 dalam pengolahan limbah *methylen blue*. Aktivitas tersebut ditunjukkan oleh besaran konstanta laju reaksi dari proses degradasi limbah *methylen blue*.

METODOLOGI

Bahan dan Peralatan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah TiO_2 teknis, larutan prekursor untuk Fe adalah $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, *aquades*, serbuk *methylen blue*, zeolit dari Bayah Kabupaten Lebak Propinsi Banten yang telah diaktifkan. Alat yang digunakan dalam penelitian ini yaitu gelas beker, gelas ukur, spatula, pipet tetes, pipet ukur, labu ukur batang pengaduk, cawan porselen, pH indikator, *furnace*, *X-Ray Diffractometer* (XRD) merek Shimadzu untuk menganalisis struktur dan ukuran kristal serta fraksi *rutile-anatase*, *Scanning Electron Microscope/Energi Dispersive Spectroscope* (SEM/EDS) merek JEOL type JSM 6510 L untuk menganalisis foto permukaan (butir), BET (BRUNAEUR-EMMET-TELLER) merk QUANTACHROME INSTRUMENTS untuk menganalisa luas permukaan, Spektrofotometri UV-Vis merek PERKIN ELMER type Lambda 25 untuk menganalisa konsentrasi *methylen blue* dalam limbah.

Pembuatan fotokatalis Fe/ TiO_2

Pembuatan Fe- TiO_2 dilakukan dengan menggunakan metode impregnasi yaitu dengan cara mencampurkan $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ dan TiO_2 dengan perbandingan berat $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 3% dari berat TiO_2 , kemudian ditambahkan *aquades* 100 ml. Larutan diaduk dengan *stirrer* selama 30 menit pada temperatur ruang. Selanjutnya diaduk sambil dipanaskan pada suhu $80^\circ\text{C} - 90^\circ\text{C}$ untuk

menguapkan airnya sampai kering kurang lebih selama 3 jam. Larutan yang telah kering kemudian dikalsinasi pada suhu 400°C selama 1 jam. Hasil yang diperoleh kemudian digerus sampai halus.

Pembuatan fotokatalis Fe/ TiO_2 -zeolit

Pembuatan Fe/ TiO_2 -zeolit dilakukan dengan memvariasi penambahan zeolit pada Fe/ TiO_2 dengan perbandingan berat Fe/ TiO_2 dan zeolit 1:1, 1:2 dan 1:3 yaitu mencampurkan 5 gram Fe/ TiO_2 dan zeolit sebanyak 5, 10 dan 15 gr. Ditambahkan *aquades* sebanyak 100 ml dan diaduk dengan *stirrer* selama 30 menit, kemudian dipanaskan pada suhu 90°C sambil diaduk sampai kering. Hasil yang diperoleh kemudian digerus sampai halus.

Limbah Simulasi

Larutan limbah simulasi dibuat dengan kandungan *methylen blue* 10 ppm, dengan cara serbuk *methylen blue* sebanyak 0,3 g ditambahkan ke dalam 300 ml *aquades* kemudian diaduk dengan *magnetic stirrer* selama 10 menit.

Aktivitas Fotokatalitik

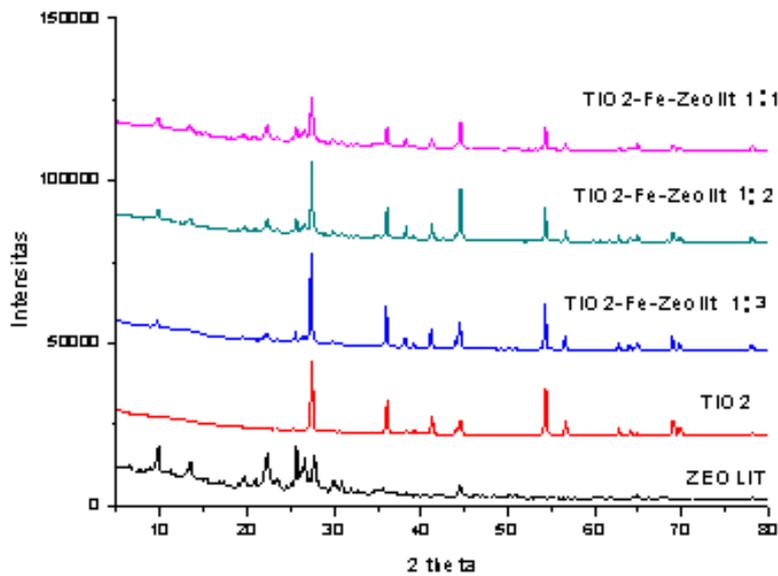
Lampu *Phillips UV-A 10 W* sebanyak 3 buah digunakan sebagai sumber foton. Reaksi fotokatalitik dilakukan dalam gelas reaksi dengan kapasitas 650 ml. Sejumlah 0,3 gram katalis ditambahkan ke dalam 300 ml larutan *methylen blue* 10 ppm, diaduk dengan *stirrer* sambil disinari dengan UV selama 5 jam. Setiap 1 jam dilakukan pencuplikan sampel untuk mengukur kadar *methylen blue* yang terurai dalam larutan dengan menggunakan peralatan spektrometri UV-Vis.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakterisasi Fotokatalis

Gambar 1 memperlihatkan puncak difraksi TiO_2 dengan pola difraksi dari fase *rutile* terlihat pada $2\theta = 27,49^\circ; 36,1^\circ; 41,2^\circ; 44,1^\circ; 54,3^\circ; 56,6^\circ; 69^\circ$, sedangkan fase *anatase* terlihat pada puncak $2\theta = 25,3^\circ$. Perbandingan fase yang terbentuk *rutile* 91,38% sedangkan fase *anatase* yang terbentuk 8,62%.

Pola difraksi dari zeolit muncul pada $2\theta = 9,6^\circ; 12,4^\circ; 25,6^\circ; 29,7^\circ; 32,1^\circ; 39,1^\circ; 55,1^\circ; 62,7^\circ$. Peak ini juga terlihat pada Fe/ TiO_2 -zeolit dengan semua variasi penambahan zeolit dengan intensitas yang tidak terlalu besar. Dari pola difraksi ini terlihat terdapat 2 fase yaitu fase Fe/ TiO_2 dan zeolit.



Gambar 1. Hasil karakterisasi XRD dari zeolit, TiO₂ dan Fe/TiO₂-zeolit

Dari hasil XRD di atas ukuran kristal dapat ditentukan dari persamaan Scherrer [9]:

$$L = \frac{0.9\lambda}{(\beta \cos \theta)}$$

dengan:

- L = ukuran kristal
- λ = panjang gelombang radiasi sinar X-ray yang digunakan
- β = lebar dari setengah puncak gelombang tertinggi
- θ = sudut puncak

Sedangkan persentase fasa *rutile* pada sampel dapat diestimasi dari intensitas peak hasil XRD dengan persamaan [10]:

$$X = \left(1 + \frac{0.8I_A}{I_R} \right)^{-1}$$

dengan:

- X = fraksi berat *rutile* dalam serbuk katalis
- I_A dan I_R = intensitas X-ray dari puncak *anatase* dan *rutile* (a.u.)

Dengan rumus di atas, diperoleh besar ukuran kristal dan fraksi *rutile* sebagai berikut (Tabel 1).

Tabel 1. Ukuran kristal dan fraksi *rutile* dari katalis Fe/TiO₂-zeolit hasil analisa XRD

No	Sampel	2θ (Rutile)	L (nm)	Fraksi Rutile (%)
1.	TiO ₂	27,49	24,04	91,39
2.	Fe/TiO ₂ -zeolit (1:1)	27,36	38,02	84,92
3.	Fe/TiO ₂ -zeolit (1:2)	27,44	38,92	78,93
4.	Fe/TiO ₂ -zeolit (1:3)	27,41	27,24	71,10

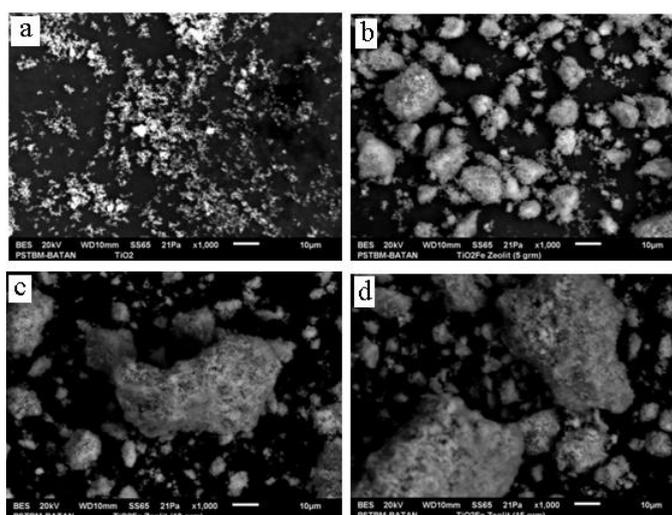
Terlihat bahwa penambahan Fe dan zeolit menyebabkan sedikit pergeseran pada puncak *rutile* dan menyebabkan terjadinya penurunan fraksi *rutile* sebanding dengan

konsentrasi penambahan zeolit. Penurunan terbesar terjadi pada penambahan zeolit 1:3 yaitu menurunkan fraksi *rutile* dari 91,38% pada TiO₂ murni menjadi 71,10%. Perbedaan dari kedua

struktur ini terletak pada distorsi struktur oktahedronnya. Pada rutil, struktur oktahedronnya sedikit distorsi orthorombik. Sementara pada anatase, distorsi jauh lebih besar, sehingga strukturnya asimetris dibandingkan orthorombik [11]. Diduga dengan adanya dopan Fe dan zeolit menyebabkan terjadinya distorsi yang cukup besar pada struktur oktahedron fase rutil sehingga sebagian fase rutil berubah menjadi fase anatase dan menurunkan fraksi rutil dari TiO_2 , semakin besar penambahan Fe dan zeolit menyebabkan makin besar penurunan fraksi rutil.

Ukuran kristal dari TiO_2 dan Fe/ TiO_2 -zeolit berkisar dari 20 s/d 40 nm. Ukuran kristal TiO_2 adalah 24,04 nm. Setelah didoping dengan Fe dan zeolit sampai perbandingan 1:2 mengalami peningkatan ukuran menjadi 38,92 nm. Namun kemudian mengalami penurunan ukuran ketika zeolit yang ditambahkan 1:3 menjadi 27,24 nm. Secara umum perubahan ukuran ini tidak terlalu besar.

Hasil karakterisasi SEM-EDS dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Hasil SEM Perbesaran 1000 x: (a) TiO_2 , (b) Fe/ TiO_2 -zeolit (1:1), (c) Fe/ TiO_2 -zeolit (1:2), (d) Fe/ TiO_2 -zeolit (1:3)

Dari gambar 2b, 2c dan 2d terlihat butir TiO_2 menempel pada sebagian permukaan dari zeolit. Ukuran butir dari TiO_2 relatif kecil yaitu < 10µm dan relative seragam, batas antar butir terlihat cukup jelas. Ukuran butir dari Fe/ TiO_2 -zeolit 1:1 cukup bervariasi yaitu sekitar 10µm dengan batas antar butir yang cukup jelas namun terjadi beberapa penggumpalan. Pada Fe/ TiO_2 -zeolit 1:2 ukuran butir dari TiO_2 tidak seragam dan berukuran relatif besar yaitu 10µm s/d 20 µm, batas antar butir yang cukup jelas namun terjadi beberapa penggumpalan. Penyebaran butir kurang merata dengan ukuran yang terlihat berbeda. Diduga hal ini disebabkan proses

penggerusan yang dilakukan terhadap sampel kurang sempurna.

Pada Fe/ TiO_2 -zeolit 1:3 ukuran butir dari TiO_2 relatif besar dan tidak merata, batas antar butir yang cukup jelas namun terjadi beberapa penggumpalan. Dilihat dari kinerja katalis TiO_2 , ukuran butir yang kecil akan menguntungkan karena dapat meningkatkan jumlah luasan kontak antara katalis dengan reaktan sehingga menaikkan kinerjanya, sebaliknya ukuran yang besar akan menurunkan luasan kontak antara katalis dan bahan limbah

Dari hasil EDS diperoleh informasi sebagaimana dalam tabel berikut:

Tabel 2. Konsentrasi kandungan atom Fe dalam katalis TiO_2

No	Bahan	Kandungan Fe (%)
1.	Fe/ TiO_2 -zeolit (1:1)	0,68
2.	Fe/ TiO_2 -zeolit (1:2)	1,03
3.	Fe/ TiO_2 -zeolit (1:3)	1,30

Terlihat dari Tabel 2 bahwa kandungan Fe dalam Fe/TiO₂-zeolit mengalami kenaikan dengan kenaikan prosentase zeolit yang ditambahkan. Hal ini diduga karena adanya

sumbangan dari Fe yang terkandung dalam zeolit.

Dari hasil uji Surface Area / BET diperoleh hasil sebagaimana dalam tabel berikut:

Tabel 3. Luas permukaan dari katalis TiO₂ dan Fe/TiO₂-zeolit

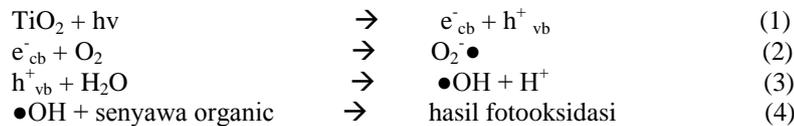
No	Bahan	Luas Permukaan (m ² /g)	Kenaikan Luas Permukaan (%)
1.	TiO ₂	9,492	-
2.	Fe/TiO ₂ -zeolit (1:1)	29,216	307,8
3.	Fe/TiO ₂ -zeolit (1:2)	30,149	317,6
4.	Fe/TiO ₂ -zeolit (1:3)	26,790	282,2

Diperoleh bahwa luas permukaan fotokatalis mengalami peningkatan dengan penambahan Fe dan zeolit. Hal ini disebabkan zeolit memiliki pori yang sangat banyak dan memiliki luas permukaan yang cukup besar, sehingga menyebabkan peningkatan luas permukaan dari TiO₂. Peningkatan tertinggi terjadi pada penambahan zeolit 1:2 dengan kenaikan mencapai 317,6% dibanding luas permukaan TiO₂. Pada penambahan zeolit 1:3, luas permukaan menurun kembali menjadi 282,2% dibanding luas permukaan TiO₂. Penurunan ini diduga karena Fe/TiO₂ masuk ke dalam pori zeolit sehingga menyebabkan berkurangnya luas permukaan fotokatalis.

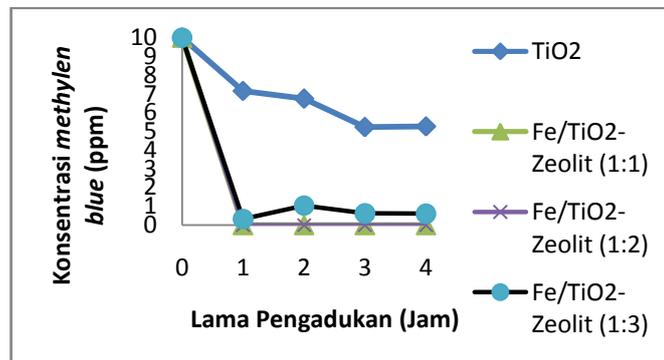
Uji Aktivitas

Limbah *methylen blue* awal mengandung konsentrasi sebesar 10 ppm. Uji reduksi katalis terhadap *methylen blue* dilakukan selama 5 jam dengan kondisi distirer dan disinari UV. Reaksi yang terjadi pada penambahan fotokatalis adalah adanya TiO₂-zeolit yang disinari UV, menyebabkan elektron (e⁻) tereksitasi dari pita valensi ke pita konduksi, meninggalkan *hole* (h⁺) pita valensi yang berinteraksi dengan air membentuk •OH, sedangkan elektron akan mengabsorpsi molekul O₂ dan H₂O menghasilkan O₂• dan •OH [12].

•OH menguraikan senyawa organik, yang terjadi pada permukaan TiO₂ reaksi 1-4 [13]:



Hasil penurunan konsentrasi *methylen blue* dalam limbah ditunjukkan oleh Gambar 3 sebagai berikut.



Gambar 3. Pengaruh waktu pengadukan terhadap konsentrasi *methylen blue*

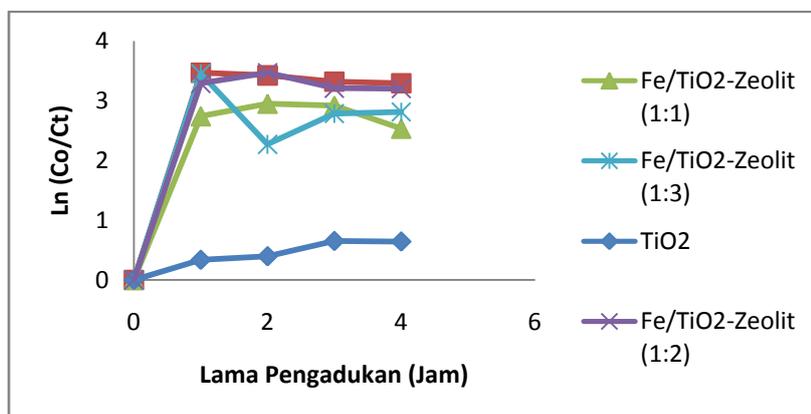
Pada 1 jam pertama terlihat penurunan konsentrasi limbah yang cukup tajam pada

penambahan Fe/TiO₂-zeolit 5%, 10% dan 15% dari 10 ppm menjadi kurang dari 1 ppm,

sedangkan hal ini tidak terlihat pada penambahan TiO_2 . Hal ini disebabkan pada 1 jam pertama, zeolit sangat dominan dalam mengadsorpsi methylen blue, sehingga mengalami penurunan konsentrasi yang sangat tajam, hal ini karena zeolit memiliki permukaan yang luas dan bekerja tanpa dipengaruhi sinar UV [14]. Sedangkan pada proses selanjutnya terjadi proses

fotokatalisis dimana yang dominan adalah Fe/TiO_2 .

C_0 adalah konsentrasi limbah awal dan C_t adalah konsentrasi limbah pada saat t , maka kurva hubungan antara lama pengadukan terhadap $\ln C_0/C_t$ dari degradasi *methylen blue* diperlihatkan oleh Gambar 4 sebagai berikut.



Gambar 4. Kurva hubungan antara lama pengadukan terhadap $\ln C_0/C_t$ dari degradasi *methylen blue*

Degradasi methylene blue oleh TiO_2 dinyatakan dengan kecepatan reaksi kinetik :

$$C_t = C_0 e^{-kt}$$

$$\ln \frac{C_t}{C_0} = -kt$$

dimana :

- C_0 = konsentrasi awal *Methylen Blue*
- C_t = konsentrasi *Methylen Blue* pada saat t
- t = waktu
- k = tetapan laju degradasi

Terlihat dari grafik di atas, dengan penambahan zeolit pada TiO_2 terjadi lonjakan laju reaksi sehingga membentuk garis yang

tajam. Bila grafik tersebut diambil rata-rata regresi linearnya maka diperoleh konstanta laju reaksi (jam^{-1}) sebagaimana pada tabel 4.

Tabel 4. Tabel konstanta laju reaksi dari TiO_2 dan Fe/TiO_2 -zeolit

Bahan	Persamaan Regresi	Konstanta Laju Reaksi (jam^{-1})
TiO_2	$y = 0,16x + 0,084$	0,160
Fe/TiO_2 -zeolit (1:1)	$y = 0,524x + 1,180$	0,524
Fe/TiO_2 -zeolit (1:2)	$y = 0,632x + 1,368$	0,632
Fe/TiO_2 -zeolit (1:3)	$y = 0,495x + 1,272$	0,495

Aktivitas fotokatalis dalam mereduksi *methylen blue* paling tinggi diperoleh pada Fe/TiO_2 -zeolit (1:2) dengan konstanta laju reaksi sebesar $0,632 \text{ jam}^{-1}$. Nilai konstanta laju reaksi ini jauh lebih besar dibandingkan TiO_2 tanpa

penambahan Fe dan zeolit. Penambahan Fe saja tanpa zeolit pada TiO_2 menyebabkan terjadinya penurunan energi bandgap dari TiO_2 sehingga terjadi pergeseran daerah aktif katalis dari daerah UV ke daerah cahaya tampak. Akibatnya kinerja

fotokatalis TiO_2 dalam mereduksi *methylen blue* di daerah UV mengalami penurunan. Dilaporkan penambahan Fe pada TiO_2 dapat menurunkan laju reaksi fotokatalis TiO_2 dari $0,129 \text{ jam}^{-1}$ menjadi $0,012 \text{ jam}^{-1}$ [15].

Dengan penambahan zeolit, terjadi proses adsorpsi terhadap limbah *methylen blue* sehingga laju reaksi penguraian limbah mengalami kenaikan yang cukup tinggi dari $0,16 \text{ jam}^{-1}$ pada TiO_2 menjadi $0,632 \text{ jam}^{-1}$ pada penambahan zeolit 1:2. Pada penambahan zeolit 1:3, karena jumlah zeolit yang terlalu banyak, menyebabkan permukaan aktif dari TiO_2 tertutupi sehingga aktifitas TiO_2 untuk mengurai limbah justru mengalami penurunan kembali. Peningkatan aktivitas fotokatalis berbasis TiO_2 dengan penambahan zeolit ini juga dilaporkan oleh beberapa penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya [14,16].

Pada penambahan zeolit 1:3 kenaikan laju reaksi tidak setinggi penambahan zeolit 1:2, yaitu laju reaksi menjadi $0,495 \text{ jam}^{-1}$. Diduga hal ini disebabkan permukaan aktif dari TiO_2 tertutupi oleh zeolit akibat masuk ke dalam pori zeolit dan menjadi penghalang terjadinya reaksi reduksi *methylen blue* sehingga menurunkan aktivitas katalis. Dari tinjauan luas permukaan fotokatalis terlihat bahwa pada penambahan zeolit 1:3, luas permukaan fotokatalis mengalami penurunan dibandingkan luas permukaan pada penambahan zeolit 1:2 walaupun tetap lebih tinggi dibanding luas permukaan TiO_2 , sehingga memberi efek menurunkan laju reaksinya.

KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan disimpulkan bahwa Fe/TiO_2 -zeolit mampu mereduksi limbah *methylen blue* dengan konstanta laju reaksi $0,524 \text{ jam}^{-1}$ untuk Fe/TiO_2 -zeolit (1:1); $0,632 \text{ jam}^{-1}$ untuk Fe/TiO_2 -zeolit (1:2) dan $0,495 \text{ jam}^{-1}$ untuk Fe/TiO_2 -zeolit (1:3). Penambahan Fe dan zeolit pada TiO_2 akan menaikkan aktivitas fotokatalitik dalam mereduksi *methylen blue* pada daerah kerja UV, yang disebabkan terjadinya kombinasi proses adsorpsi dari zeolit, meskipun terjadi penurunan *bandgap* pada fotokatalis TiO_2 akibat penambahan Fe. Penambahan zeolit pada perbandingan Fe/TiO_2 -zeolit (1:3), justru akan menghambat permukaan aktif dari TiO_2 sehingga menurunkan kinerja katalis dalam mendegradasi *methylen blue*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kepada Ka. BK2K, Ka. Sub Bid KKPR, Drs. Bambang Sugeng, MT, Dra. Deswita, Agus Sudjatna, AMd. dan Sari Hasnah, A.Md serta KPTF di PSTBM-BATAN

yang telah banyak membantu dalam pengujian, karakterisasi dan penyusunan makalah ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. Rashed, M.N., El-Amin, A.A., *Photocatalytic Degradation of Methyl Orange in Aqueous TiO_2 under Different Solar Irradiation Sources*, International Journal of Physical Science, Vol. 2, No.3 (2007) 073-081.
2. Van der Zee F P., *Anaerobic Azo Dye Reduction*, Wageningen University (2002).
3. Wijaya, K., Sugiharto, E., Fatimah, I., Sudiono, S., Kurniaysih, D., *Utilisasi TiO_2 -Zeolit dan Sinar UV untuk Fotodegradasi Zat Warna Congo Red*, TEKNOIN, 11(3) (2006) 199-209.
4. M. Radecka, M. Rekas, A. Trenczek-Zajac, K. Zakrzewsk, *Importance of the bandgap energi and flatband potential for application of modified TiO_2 Photoanodes in water photolysis*, J Power Sources, Vol 181 (2008) 46-55.
5. Ramadhana, A.K.K., Wardhani, S., dan Purwonugroho, D., *Fotodegradasi Zat Warna Methyl Orange Menggunakan TiO_2 -Zeolit dengan Penambahan Ion Persulfat*, Kimia Student Journal, Vol. 1, No. 2 (2013) 168-174.
6. Aliah, H., Sawitri, A., Aji1, M. P., Setiawan, A., Sustini, E., Budiman, M., dan Abdullah, M., *Pelapisan Partikel TiO_2 pada Polimer Polipropilena dan Aplikasinya sebagai Reusable Photocatalyst*, Prosiding Seminar Nasional Material Fisika, Institut Teknologi Bandung, Bandung (2012).
7. Fatimah, I., dan Wijaya, K., *Sintesis TiO_2 /Zeolit sebagai Fotokatalis pada Pengolahan Limbah Cair Industri Tapioka secara Adsorpsi-Fotodegradasi*, Teknoin, Vol. 10 (4) (2005) 257-267.
8. Fatimah, I., Sugiharto, E., Wijaya, K., Tahir, I., Kamalia., *Titan Dioksida Terdispersi Pada Zeolit Alam (TiO_2 /Zeolit) dan Aplikasinya untuk Fotodegradasi Congo Red*, Indonesia Journal of Chemistry, Vol.6, No.1 (2006) 138-42.
9. Gunlazuardi J., *Fotokatalisis pada permukaan TiO_2 : Aspek Fundamental dan Aplikasinya*, Prosiding Seminar Nasional Kimia Fisika II, Jakarta (2001)
10. Suryanarayana C., Norton M.G., *X-ray Diffraction*, Plenum Press, New York (1998).

11. Fitriah, Desinfeksi air secara fotoelektrokatalisis dengan menggunakan lapisan TiO_2 yang diimmobilisasi pada logamtitanium, Skripsi, FMIPA,UI,Depok (1998)
12. Mehta P., Mehta R., Surana M., Kabra B. V., *Influence Of Operational Parameters On Degradation Of Commercial Textile Azo Dye Acid Blue 113 (Cyane SR) by Advanced Oxidation Technology*, J. Curr. Chem. Pharm.Sc, Vol.1, No.1 (2011) 28-36.
13. Laoufi N. A, Tassalit D., Bentahar F., *The Degradation of Phenol In Water Solution By TiO_2 Photocatalysis In A Helical Reactor*, Global Nest, Vol.10, No.3 (2008) 404-418.
14. Christiana A D, Sri Wardhani, Danar Purwonugroho, Pengaruh Konsentrasi TiO_2 dalam Zeolit Terhadap Degradasi Methylene Blue Secara Fotokatalitik, *Kimia Student Journal*, Vol. 1, No 1 (2014) 8-14.
15. Agus Salim A., Auring R. dan Asep Nana S, Uji Aktivitas Fe/ TiO_2 -N Dalam Pengolahan Limbah Methylen Blue Secara Fotokatalisis, *Prosiding Seminar Nasional Hamburan Neutron dan Sinar-X* (2015) 1-6.
16. Novita Rizqi A, Sri Wardhani, Mohammad Misbah K, Fotodegradasi Zat Warna Jingga Metil Menggunakan TiO_2 -Zeolit dengan Penambahan Anion Anorganik NO_3 , *Kimia Student Journal*, Vol. 1, No 1(2013) 98-104.

KINERJA KONSORSIUM BAKTERIA DARI SUNGAI OPAK YOGYAKARTA DALAM REDUKSI NITRAT DENGAN SUMBER KARBON YANG BERBEDA

Hanies Ambarsari, Miswanto

Balai Teknologi Pengolahan Air dan Limbah (BTPAL) – BPPT
Gedung 820 Geostech, Puspiptek Serpong, Tangerang Selatan, Banten 15314
Email: hanies.ambarsari@gmail.com

ABSTRAK

KINERJA KONSORSIUM BAKTERIA DARI SUNGAI OPAK YOGYAKARTA DALAM REDUKSI NITRAT DENGAN SUMBER KARBON YANG BERBEDA. Sebuah penelitian di laboratorium telah dilakukan untuk mengetahui pengaruh dari penambahan dan jenis sumber karbon terhadap aktivitas reduksi nitrat (denitrifikasi) oleh konsorsium bakteria yang telah diisolasi dari Sungai Opak, Yogyakarta. Penelitian ini dilakukan dengan metode eksperimental menurut Rancangan Acak Lengkap (RAL) yang diulang sebanyak tiga kali. Perlakuan yang diujikan adalah sumber karbon dengan lima taraf perlakuan, yaitu: C0 (tanpa penambahan sumber karbon dan sedimen sungai), C1 (penambahan sedimen sungai tanpa penambahan sumber karbon), C2 (penambahan methanol dan sedimen sungai), C3 (penambahan glukosa dan sedimen sungai), dan C4 (penambahan asam asetat dan sedimen sungai). Parameter utama yang diukur adalah konsentrasi nitrat, sedangkan parameter pendukung meliputi nilai pH, suhu, dan jumlah mikroba. Penelitian ini dijalankan dengan sistem *Batch* dan pengambilan sampel dilakukan setiap 3 hari sekali selama tiga minggu. Konsentrasi nitrat diukur dengan metode kolometri dan data reduksi nitrat kemudian dianalisis menggunakan analisis varian (Uji F) dan dilanjutkan dengan Uji Beda Nyata Terkecil (BNT). Aktivitas reduksi nitrat dihitung berdasarkan substrat sisa. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa glukosa merupakan sumber karbon yang paling kuat menstimulasi aktivitas reduksi nitrat konsorsium bakteria dari Sungai Opak, Yogyakarta.

Kata Kunci : denitrifikasi, reduksi nitrat, Sungai Opak, sumber karbon, metanol, glukosa, asam asetat.

ABSTRACT

PERFORMANCE OF BACTERIAL CONSORTIUM FROM OPAK RIVER YOGYAKARTA IN NITRATE REDUCTION USING DIFFERENT CARBON SOURCES. A laboratory study was conducted to determine the effect of the addition and type of different carbon sources on the activity of nitrate reduction (denitrification) by a consortium of bacteria that have been isolated from Opak River, Yogyakarta. This research was carried out with an experimental method according to a completely randomized design (CRD) which was repeated three times. The treatments tested were the different sources of carbon with a five-stage treatment, namely: C0 (without the addition of a carbon source and stream sediments), C1 (the addition of river sediment without the addition of a carbon source), C2 (addition of methanol and river sediment), C3 (addition of glucose and river sediments) and C4 (the addition of acetic acid and river sediments). The main parameter measured was the concentration of nitrate, while supporting parameters were including pH value, temperature, and number of microbes. This study was run with a batch system and the sampling was done every 3 day for three weeks. Nitrate concentrations were measured using the Colometric method and the nitrate reduction data were then analyzed using analysis of variance (F test) and continued with Least Significant Difference Test (BNT). The Activity of nitrate reduction was calculated based on the rest of the substrate. The results of this study indicated that glucose was of the most powerful carbon source stimulating the activity of nitrate reduction by a bacteria consortium from Opak River, Yogyakarta.

Keywords : denitrification, nitrate reduction, Opak River, carbon source, methanol, glucose, acetic acid

PENDAHULUAN

Nitrogen adalah salah satu unsur yang esensial bagi makhluk hidup. Nitrogen mengalami reaksi oksidoreduksi sehingga dapat terbentuk berbagai senyawa yang berbeda-beda sifatnya. Produk akhir dari reaksi oksidasi senyawa yang mengandung N adalah nitrat (NO_3^-) [1]. Nitrat bersifat mudah mengalami transportasi karena kandungan ion negatifnya, sehingga menyebabkan senyawa ini dapat masuk ke dalam perairan. Nitrat di perairan berasal dari dua sumber, yaitu sumber organik seperti residu hewan dan tumbuhan serta sumber anorganik seperti pupuk buatan. Transportasi nitrat dari daratan ke lingkungan akuatik diperantarai oleh sungai. Sungai ini menerima masukan nitrat di

sepanjang aliran seperti dari lahan pertanian, industri dan rumah tangga.

Nitrat merupakan senyawa nutrisi yang sangat penting bagi pertumbuhan tanaman, tetapi nitrat yang berlebihan juga dapat merugikan. Konsentrasi nitrat yang tinggi di perairan dapat memicu terjadinya eutrofikasi yang sangat merugikan bagi lingkungan [2]. Eutrofikasi ini menyebabkan lingkungan perairan berwarna hijau karena pertumbuhan plankton dan makrofit yang sangat subur, bau yang kurang sedap, pendangkalan dan menyebabkan biota air seperti ikan dapat mati karena kekurangan oksigen. Kerugian lain dari konsentrasi nitrat yang berlebihan pada air minum dapat menyebabkan penyakit *methemoglobinemia* yang mematikan pada bayi

[3]. Oleh karena itu agen untuk menurunkan kadar nitrat di lingkungan sangat dibutuhkan. Mikroba menjadi salah satu alternatif pilihan karena mampu mereduksi nitrat di lingkungan dengan mengubahnya menjadi bentuk lain yang lebih aman bagi lingkungan.

Nitrat direduksi oleh mikroba menjadi nitrit, ammonia, bahkan sampai menjadi nitrogen bebas. Bakteri pereduksi nitrat umumnya bersifat fakultatif anaerobik dan nitrat digunakannya sebagai akseptor elektron untuk tumbuh pada kondisi anaerobik tersebut [4]. Beberapa jenis bakteri mampu mereduksi nitrat menjadi nitrit (NO_2^-), ammonia (NH_3), nitrogen oksida (NO_2) dan nitrogen bebas (N_2). Umumnya bakteri mereduksi nitrat sampai menjadi gas N_2 , tetapi ada juga mikroba yang hanya mampu mereduksi nitrat sampai tingkat ammonium (NH_4^+) saja. Jadi reduksi nitrat oleh bakteri ini tergantung pada sifat fisiologis bakteri yang bersangkutan. Beberapa genus bakteri yang mampu mereduksi nitrat antara lain *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Paracoccus*, *Thiobacillus*, *Chromobacterium*, *Corinebacterium*, dan *Hypomicrobium*. Reduksi nitrat oleh mikroba-mikroba tersebut tidak menyebabkan hilangnya nitrogen dari lingkungan, namun hanya mengalami transformasi ke bentuk lain [5].

Kecepatan reduksi nitrat berhubungan erat dengan aktivitas mikroba dan faktor lingkungan. Faktor-faktor lingkungan yang berpengaruh antara lain adalah sumber karbon, kelembaban, aerasi, pH, dan suhu [6]. Sumber karbon merupakan faktor lingkungan yang penting dalam mengontrol kecepatan reduksi nitrat. Mikroba menggunakan sumber karbon sebagai tenaga pereduksi dan substrat untuk tumbuh. Pemberian sumber karbon dalam media harus memperhatikan rasio C/N. Bakteri memiliki kebutuhan rasio C/N yang berbeda-beda tergantung pada lingkungan tumbuhnya. Bakteri yang tumbuh dengan N tinggi seperti bakteri pendenitrifikasi ini rasio C/N-nya mencapai 1:3 [7].

Penelitian kali ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan dan jenis sumber karbon terhadap aktivitas reduksi nitrat konsorsium bakteri yang berhasil diisolasi dari Sungai Opak, Yogyakarta. Beberapa sumber karbon yang dipakai adalah metanol, gula (glukosa), dan asam asetat. Dari hasil studi sebelumnya diketahui bahwa kecepatan reduksi nitrat berkaitan dengan berat molekul dan sifat sumber karbon, antara lain mudah tidaknya didegradasi. Metanol merupakan sumber karbon yang ekonomis dan efektif dalam meningkatkan aktivitas denitrifikasi [8] dan dapat meningkatkan efisiensi denitrifikasi, tetapi juga

ditemukan bahwa penambahan metanol yang berlebihan ternyata juga dapat menghambat proses denitrifikasi. Konsentrasi metanol yang masih dapat ditoleransi oleh mikroba adalah 2000 mg/L (2000 ppm) [9]. Sedangkan asam asetat digunakan sebagai sumber karbon dalam penelitian ini untuk reduksi nitrat adalah karena dari penelitian sebelumnya diketahui bahwa asam asetat merupakan substrat yang paling efisien untuk denitrifikasi [2]. Glukosa sendiri adalah karbohidrat yang paling sederhana dan banyak digunakan sebagai sumber karbon oleh bermacam bakteri karena sifatnya yang mudah didegradasi. Dalam literatur disebutkan bahwa karbohidrat merupakan sumber karbon utama bagi mikroorganisme heterotrof seperti mikroba pendenitrifikasi ini [10]. Literatur yang lain juga menyebutkan bahwa dari berbagai macam jenis karbohidrat, maka glukosa merupakan monosakarida yang paling sering digunakan sebagai nutrisi bakteri [5].

METODOLOGI

Bahan dan Peralatan

Obyek penelitian adalah konsorsium bakteri yang diperoleh dari Sungai Opak, Yogyakarta. Bahan-bahan yang diperlukan antara lain adalah: kapas, tisu, *aluminium foil*, kertas label, karet, kertas payung, spiritus, alkohol 70%, akuades, agar, tripton, ekstrak khamir, glukosa, metanol, asam asetat, potasium nitrat, sodium hidroksida, asam salisilat, asam sulfur, asam klorida, *sulfanilamide*, *N-(1-naphthyl) ethylenediamine hydrochloric*, NaNO_2 , K_2HPO_4 , alkohol 95%, kalium iodida, kristal violet, safranin, pasir dan *cyclohexamide*. Sedangkan alat-alat yang dipakai adalah cawan petri, labu *Erlenmeyer*, *Drugalsky*, pipet ukur, pipet tetes, mikro pipet, gelas ukur, tabung reaksi, jarum ose, autoklaf, inkubator, *colony counter*, *vortex*, pH meter elektrik, termometer, *Bunsen burner*, Spektrofotometer, mikroskop, neraca analitik, *fermenter batch*, dan labu ukur.

Tata Kerja

Penelitian ini dilakukan di laboratorium Balai Teknologi Lingkungan (BTL), Puspiptek Serpong, Kota Tangerang Selatan, Banten selama enam bulan. Penelitian dilakukan dengan disain eksperimen menggunakan rancangan eksperimen Random Acak Lengkap (RAL). Perlakuan yang dicobakan adalah faktor sumber karbon (C) dengan lima taraf perlakuan, yaitu:

C0 : tanpa penambahan sumber karbon dan sedimen sungai

C1 : penambahan sedimen sungai + tanpa penambahan sumber karbon

C2 : penambahan metanol 1,5 g/L + sedimen sungai

C3 : penambahan glukosa 0,25 g/L + sedimen sungai

C4 : penambahan asam asetat 1 g/L + sedimen sungai

Perlakuan tersebut dilakukan menurut Rancangan Acak Lengkap (RAL) dengan tiga pengulangan. Parameter yang diukur meliputi parameter utama yaitu kadar nitrat dan parameter pendukung meliputi pH, suhu, jumlah mikroba dan jenis mikroba. Variabel yang diamati meliputi variabel bebas berupa jumlah dan jenis bakteri pereduksi nitrat dengan variabel tergantung berupa konsentrasi nitrat.

Penyiapan media uji aktivitas reduksi nitrat dilakukan dengan menggunakan *fermenter batch* bervolume 10 L sebanyak 5 buah dan masing-masing diisi dengan 0,5 g/L KNO_3 , 0,2 g/L *Cyclohexamide*, dan 3 mg/L K_2HPO_4 . *Fermenter batch* dengan perlakuan C0 dan C1 tidak ditambah dengan sumber karbon, sedangkan C2, C3, dan C4 masing-masing ditambah dengan sumber karbon secara berurutan: metanol, glukosa, dan asam asetat. Dengan memperhitungkan rasio C/N maka penambahan sumber karbon metanol adalah sebanyak 1,5 g/L, glukosa sebanyak 0,25 g/L, dan asam asetat sebanyak 1,0 g/L. Masing-masing ditambah dengan pasir sebagai tempat hidup bakteri dan aquades sampai penuh, selanjutnya disterilisasi dengan autoklaf selama 20 menit dengan tekanan 2 atm.

Uji aktivitas reduksi nitrat dilakukan dengan menginokulasikan 5 g/L sampel untuk sedimen basah dari Sungai Opak, Yogyakarta ke dalam masing-masing *fermenter batch* kecuali perlakuan C0, lalu *fermenter batch* itu diinkubasi pada suhu 25°C selama 3 minggu. Setiap 3 hari sekali dilakukan pengukuran konsentrasi nitrat, suhu, pH, dan jumlah (populasi) bakteri. Pengukuran konsentrasi nitrat dilakukan sesuai dengan prosedur dari metode Kolorimetri [11]. Sedangkan penghitungan jumlah (populasi) mikroba dilakukan dengan metode TPC (*Total Plate Count*) yang didasarkan pada *Colony Forming Unit* (CFU) dengan *caraspread plate* pada medium PCA [12]. Pengukuran nilai pH dilakukan dengan alat pH-meter dan pengukuran suhu dilakukan dengan alat termometer. Karakteristik morfologis mikroba juga dilakukan dengan prosedur pewarnaan Gram (*Gram staining*) untuk diamati secara mikroskopis dan pengamatan bentuk koloni yang tumbuh pada medium agar PCA pada sebuah

cawan petri. Motilitas sel mikroba juga diamati dengan menggunakan mikroskop.

Data yang diperoleh lalu dianalisis menggunakan analisis varian (Uji F) dengan tingkat kesalahan 5% dan 1%. Apabila hasil analisis menunjukkan perlakuan berbeda sangat nyata, maka pengujian dilanjutkan dengan uji BNT.

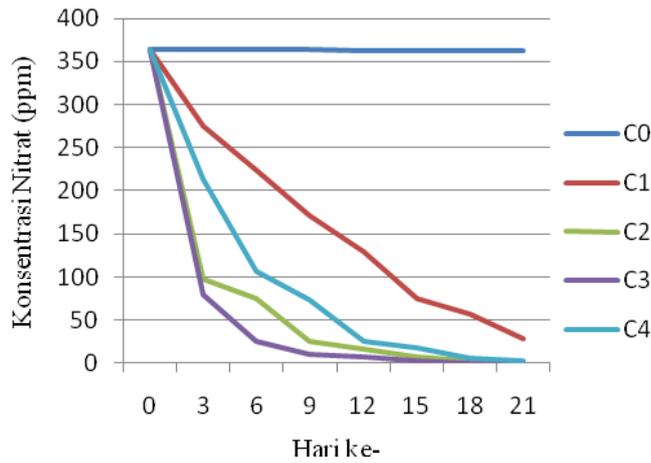
HASIL DAN PEMBAHASAN

Reduksi nitrat oleh konsorsium bakteri pereduksi nitrat (pendenitrifikasi) dijalankan menggunakan sistem *batch*. Sistem *batch* ini merupakan sistem yang paling sederhana karena tanpa penambahan nutrisi selama proses berlangsung sehingga cocok untuk mengamati proses reduksi nitrat, yaitu dengan mengamati substrat awal dan substrat akhir [13].

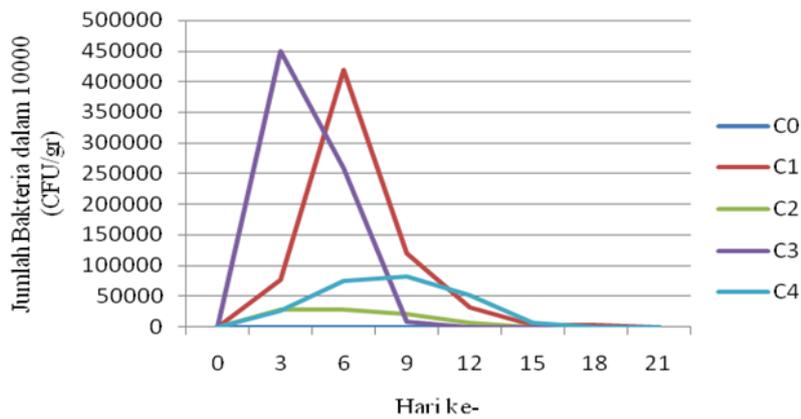
Hasil uji reduksi nitrat dengan sumber karbon metanol, glukosa, dan asam asetat dapat dilihat pada Gambar 1. Gambar tersebut menjelaskan bahwa reduksi nitrat pada masing-masing perlakuan ternyata berbeda. Perlakuan C0 sebagai kontrol tidak menunjukkan penurunan konsentrasi nitrat. Penyebabnya adalah karena bakteri yang berperan dalam menurunkan konsentrasi nitrat tidak tumbuh di dalam *fermenter*.

Pada perlakuan C1 tetap terjadi reduksi nitrat meskipun tanpa penambahan sumber karbon, tetapi karena sedimen sungai yang ditambahkan juga mengandung bakteri, maka bakteri dari sedimen sungai itulah yang ikut berperan dalam reduksi nitrat yang terjadi pada perlakuan ini, walaupun aktivitasnya lebih rendah dibandingkan dengan perlakuan lainnya yang ditambah sumber karbon (perlakuan C2, C3, dan C4).

Aktivitas reduksi nitrat yang tertinggi ditunjukkan pada perlakuan dengan penambahan glukosa (C3). Hal ini sesuai dengan hasil penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa glukosa merupakan sumber karbon yang paling potensial sebagai elektron donor dalam proses reduksi nitrat [14]. Tingginya nitrat yang direduksi didukung oleh populasi dan jenis bakteri yang hidup di dalamnya. Populasi bakteri pada perlakuan dengan penambahan glukosa ternyata juga lebih banyak dibandingkan perlakuan yang lain (Gambar 2), sementara jenis bakteri yang hidup di dalamnya juga lebih banyak, yaitu 6 isolat, sedangkan pada perlakuan lain hanya diperoleh 3 isolat (Tabel 1).



Gambar 1. Penurunan konsentrasi nitrat selama perlakuan



Gambar 2. Pertumbuhan jumlah bakteri selama perlakuan

Tabel 1. Data morfologi koloni, sifat Gram, bentuk sel dan motilitas isolate pereduksi nitrat dari Sungai Opak, Yogyakarta.

Isolat	Morfologi Koloni				Sifat Gram	Bentuk Sel	Motilitas
	Bentuk	Tepi	Elevasi	Warna			
C1.1	Tak teratur	Halus	Muncul	Putih mengkilap	Positif	Coccus	Non motil
C1.2	Kecil	Halus	Cembung	Putih	Positif	Coccus	Non motil
C1.3	Bulat	Halus	Cembung	Putih	Positif	Coccus	Non motil
C2.1	Tak teratur	Berlekuk	Berkerut	Putih	Negatif	Batang	Motil
C2.2	Tak teratur	Berlekuk	Cembung	Putih	Positif	Coccus	Non motil
C2.3	Bulat	Halus	Berlekuk	Putih	Negatif	Coccus	Non motil
C3.1	Tak teratur	Bercuping	Berkerut	Putih	Positif	Batang	Motil
C3.2	Tak teratur	Berlekuk	Berlekuk	Putih	Negatif	Coccus	Motil
C3.3	Akar	Bercuping	Cembung	Putih	Negatif	Coccus	Motil
C3.4	Tak teratur	Bercuping	Muncul	Putih	Negatif	Batang	Non motil
C3.5	Bulat	Halus	Cembung	Putih	Negatif	Coccus	Non motil
C3.6	Bulat	Halus	Cembung	Ungu	Negatif	Coccus	Motil
C4.1	Tak teratur	Berlekuk	Muncul	Putih transparan	Negatif	Batang	Motil
C4.2	Kecil	Halus	Cembung	Putih	Negatif	Batang	Motil
C4.3	Bulat	Halus	Cembung	Putih	Negatif	Coccus	Non motil

Keterangan:

C1.1 – C1.3 = 3 isolat pada perlakuan C1

C2.1 – C2.3 = 3 isolat pada perlakuan C2

C3.1 – C3.6 = 6 isolat pada perlakuan C3

C4.1 – C4.3 = 3 isolat pada perlakuan C4

Dari analisis sidik ragam (Tabel 2) diketahui bahwa F hitung berbeda sangat nyata. Hal ini menunjukkan bahwa antar perlakuan memberikan pengaruh yang nyata terhadap aktivitas reduksi nitrat. Glukosa merupakan sumber karbon yang paling tinggi dalam meningkatkan aktivitas reduksi nitrat, dibuktikan dari data bahwa pada hari ke-21 sudah tidak terdeteksi. Sebaliknya, asam asetat

merupakan sumber karbon yang paling lambat dalam meningkatkan aktivitas reduksi nitrat dengan adanya data konsentrasi nitrat pada hari ke-21 yang masih tersisa sebanyak 3,27 ppm (data primer). Uji BNT dilakukan setelah analisis sidik ragam menghasilkan F hitung yang berbeda sangat nyata (Tabel 3).

Tabel 2. Analisis varian aktivitas reduksi nitrat oleh konsorsium bakteri dari Sungai Opak, Yogyakarta dengan sumber karbon berbeda.

Sumber	DB	JK	KT	F hitung	F tabel	
					0.05	0.01
Perlakuan	4	565808.95	141452.24	43.27**	2.65	3.93
Galat	30	3098074	3269.14			
Total	34	663883.40				

Keterangan:

** : berbeda sangat nyata

Tabel 3. Uji BNT aktivitas reduksi nitrat oleh konsorsium bakteri dari Sungai Opak, Yogyakarta dengan sumber karbon berbeda.

	C0	C1	C2	C3
C4	299.56*	73.45 ^{ns}	31.73 ^{ns}	46.08 ^{ns}
C3	345.63*	119.53*	14.35 ^{ns}	
C2	331.28*	105.18*		
C1	226.10*			
C0				

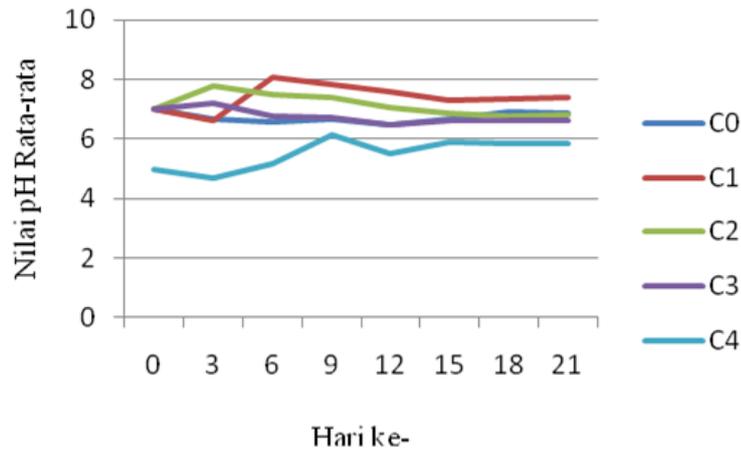
Keterangan: * : berbeda nyata pada taraf $P < 0.05$

ns : berbeda tidak nyata

Hasil uji BNT tersebut menunjukkan bahwa perlakuan dengan dan tanpa sumber karbon berpengaruh terhadap aktivitas reduksi nitrat. Hal ini ditunjukkan oleh hasil uji BNT antara C0 dengan perlakuan lainnya, dan juga antara C1 dengan perlakuan C3 dan C2. Hasil itu juga menunjukkan bahwa antara perlakuan C1 dengan C3, perlakuan C2 dengan C3 atau C4, serta perlakuan C3 dengan C4 berbeda tidak nyata terhadap aktivitas reduksi nitrat. Walaupun demikian, penambahan sumber karbon glukosa terbukti meningkatkan aktivitas reduksi nitrat oleh konsorsium bakteri dari Sungai Opak, Yogyakarta menjadi lebih tinggi dibandingkan dengan penambahan sumber karbon metanol atau asam asetat.

Tingginya konsentrasi nitrat yang direduksi pada perlakuan dengan penambahan

glukosa ini didukung oleh faktor lingkungan seperti suhu, pH, jenis dan jumlah populasi bakteri. Aktivitas bakteri pereduksi nitrat dipengaruhi juga oleh pH [6]. Reduksi nitrat dapat terjadi pada kisaran pH 3,9-9,0. Faktor yang menjadi penyebab rendahnya aktivitas bakteri pada perlakuan C4 dapat terjadi karena pengaruh dari derajat keasaman atau pH ini. Nilai pH awal yang rendah (pH 4,7) seperti yang terlihat pada Gambar 3 menyebabkan aktivitas bakteri kurang optimal. Reduksi nitrat tetap berjalan cepat pada pH 4,7 [6], tetapi nilai pH yang rendah menyebabkan hanya spesies tertentu yang dapat tumbuh di dalamnya [15]. Aktivitas bakteri pereduksi nitrat dapat berjalan optimum pada kisaran pH 7-8 [16]. Fluktuasi pH selama perlakuan dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Fluktuasi nilai pH selama penelitian pada setiap perlakuan

Berdasarkan data pada Gambar 3 tersebut, dapat dilihat bahwa nilai pH pada perlakuan C4 dan C3 cenderung naik. Kenaikan ini dapat terjadi karena adanya kenaikan konsentrasi ammonium hasil dari reduksi nitrat, seperti yang telah disarikan dalam literatur sebelumnya bahwa nitrat dapat direduksi dengan sempurna menjadi ammonium oleh bakteri [6]. Proses ini disebut sebagai nitrat disimilatif. Reaksi ammonium dan air menghasilkan senyawa NH_4OH yang bersifat basa, sehingga menaikkan nilai pH [17].

Sebaliknya, penurunan pH pada perlakuan C1 dan C2 disebabkan karena terjadinya penumpukan asam hasil metabolisme primer seperti asam sitrat, asam fumarat, dan asam laktat [18]. Penurunan juga terjadi karena nitrat direduksi menjadi N_2 dan N_2O secara langsung, tidak melalui jalur ammonium. Proses ini dikenal sebagai denitrifikasi [4].

Temperatur merupakan salah satu faktor yang juga dapat mempengaruhi kecepatan reduksi nitrat. Reduksi nitrat dapat terjadi pada suhu 5°C sampai 75°C dan optimum pada suhu $60\text{-}75^\circ\text{C}$ [19]. Semua perlakuan itu diinkubasi pada suhu 25°C di dalam ruangan dan selama pengamatan berlangsung tidak terjadi perubahan suhu, yaitu tetap menunjukkan suhu 25°C untuk setiap perlakuan (data primer tidak ditampilkan). Karena suhu yang stabil itu, maka pengaruh suhu terhadap aktivitas reduksi nitrat diabaikan. Reduksi nitrat merupakan reaksi eksotermik yang mengeluarkan kalor ke lingkungan. Suhu yang stabil selama perlakuan ini kemungkinan disebabkan oleh pengaruh suhu lingkungan yang begitu besar sehingga kalor hasil reaksi eksotermik yang dikeluarkan oleh bakteri tidak mempengaruhi suhu di dalam fermenter batch secara signifikan.

Tinggi rendahnya konsentrasi nitrat yang direduksi sangat erat hubungannya dengan populasi bakteri yang terdapat di dalamnya. Isolasi bakteri pereduksi nitrat pada masing-masing perlakuan menghasilkan isolat-isolat yang berbeda (Tabel 1). Perlakuan tanpa penambahan sumber karbon diperoleh 3 isolat, pada reaktor dengan penambahan metanol dan asam asetat masing-masing diperoleh 3 isolat, sedangkan perlakuan dengan penambahan glukosa diperoleh 6 isolat. Isolat-isolat yang diperoleh kebanyakan adalah Gram negatif (11 isolat), sedangkan yang lainnya adalah Gram positif (4 isolat). Hal ini sesuai dengan hasil studi sebelumnya [14] yang menyatakan bahwa bakteri yang berperan dan proses reduksi nitrat pada umumnya adalah bakteri Gram negatif.

Gambar pertumbuhan bakteri pereduksi nitrat selama perlakuan (Gambar 2) menunjukkan bahwa sumber karbon yang tercepat dalam menstimulasi pertumbuhan bakteri adalah glukosa, pada hari ke-3 telah mencapai titik tertinggi jumlah populasinya. Populasi bakteri tanpa sumber karbon mencapai titik tertinggi pada hari ke-6, metanol pada hari ke-3, dan asam setat pada hari ke-9. Pada perlakuan C2 atau dengan penambahan metanol terlihat konsorsium bakteri membutuhkan waktu lama untuk beradaptasi dibandingkan dengan perlakuan tanpa sumber karbon atau sumber karbon glukosa. Hal ini sesuai dengan hasil studi sebelumnya yang menunjukkan bahwa proses reduksi nitrat dengan sumber karbon metanol membutuhkan waktu adaptasi karena hanya spesies tertentu yang dapat memanfaatkannya [20]. Metanol ini selektif untuk jenis *Hypomicrobium* [8].

Gambar 2 juga menunjukkan perbedaan antara perlakuan dengan sumber karbon dan tanpa sumber karbon. Walaupun populasi bakteri pada perlakuan tanpa sumber karbon berjumlah besar, tapi hasil penurunan nitratnya kecil. Sementara pada perlakuan C2 dan C4 dengan populasi bakteri yang kecil ternyata dapat menurunkan konsentrasi nitrat yang lebih tinggi. Hal ini disebabkan oleh kemampuan atau kinerja yang lebih tinggi dari bakteri yang hidup di dalam perlakuan C2 dan C4 ketika melakukan aktivitas reduksi nitrat dibandingkan dengan perlakuan tanpa sumber karbon. Hal ini sudah disebutkan dalam studi sebelumnya bahwa laju reduksi nitrat sangat berhubungan erat dengan aktivitas dan kinerja bakteri pereduksi nitrat, bukan hanya dengan jumlah populasi bakteri [21].

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan tersebut, maka dapat diambil kesimpulan bahwa laju reduksi nitrat sangat erat hubungannya dengan sumber karbon yang digunakan. Sumber karbon yang berbeda-beda dapat menstimulasi pertumbuhan dan aktivitas bakteri pereduksi nitrat secara berbeda-beda pula. Dari hasil penelitian ini dapat diketahui bahwa glukosa merupakan sumber karbon yang paling efektif dalam menstimulasi proses reduksi nitrat dibandingkan dengan metanol dan asam asetat.

Dalam mengoptimalkan proses reduksi nitrat tidak hanya dari aktivitas bakterinya saja, tetapi juga faktor lingkungan seperti sumber karbon harus diperhatikan dalam pemilihannya. Dari hasil penelitian kali ini, masih diperlukan penelitian lanjutan tentang reduksi nitrat dengan optimasi faktor lingkungan yang lain misalnya nilai pH, suhu, dan sebagainya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kedua penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah membantu dalam kegiatan penelitian ini, terutama yang bekerja di Balai Teknologi Lingkungan (BTL) – BPPT atas segala fasilitas laboratorium di kawasan Puspipetek Serpong, Tangerang Selatan, dan yang bekerja di Fakultas Biologi, Universitas Jendral Soedirman, Purwokerto atas kerjasamanya yang baik selama ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. Ilmu Alam Net. 2016. 4 Proses Tahapan Siklus Nitrogen. Artikel 20 Maret 2016 <http://ilmualam.net/4-proses-tahapan-siklus-nitrogen.html>. Diakses tanggal 15 Agustus 2016 pukul 13.25 WIB.
2. M. Marchetto, P.G. Eloisa, R.C. Jose, C.P. Roberto, E.M. Morales. 2003. Estimate of denitrifying microbiota in tertiary sewage treatment and kinetics of the denitrification process using different sources of carbon. *Brazilian Journal Microbiology* 34 (2): 1-9.
3. H. Ambarsari. 2000. *Effectiveness of Plant Residues for Biological Nitrate Reduction in Freshwater System*. Thesis. Lincoln University Canterbury, New Zealand.
4. M. Alexander. 1977. *Introduction to Soil Microbiology*. Second Edition. John Wiley & Sons., New York.
5. M.M. Suterdjo, A.G. Kartasapoetra, Sastroatmodjo. 1991. *Mikrobiologi Tanah*. Penerbit Rineka Cipta, Jakarta.
6. E.A. Paul, F.E. Clark. 1996. *Soil Microbiology and Biochemistry*. Academic Press, Inc., San Diego.
7. J.W. Payne. 1980. *Microorganism and Nitrogen Source Transport and Utilization of Amino Acids, Peptides, Protein and Related Substrates*. John Wiley & Sons Inc., New York.
8. G.T. Spearl, D.S. Hare. 1971. Denitrification with methanol: A selective enrichment for *Hypomicrobium* species. *Journal of Bacteriology* 108 (2): 733-736.
9. J. J. Her, J.S. Huang. 1995. Influences of carbon source and C/N ratio on nitrate/nitrite denitrification and carbon breakthrough. *Bioresource Technology* 54: 45-51.
10. F.A. Carey. 1996. *Organic Chemistry*. Third Edition. McGraw-Hill, New York
11. J.M. Anderson, J.S. I. Ingram. 1993. *Tropical Soil Biology and Fertility: A Handbook of Method*. CAB International, London.
12. Cappuccino, J.G., Welsh, C.T. 2016. *Microbiology: A Laboratory Manual*. Pearson Education.
13. M.J. Waites, L.M. Neil., S.R. John, H. Gary. 2001. *Industrial Microbiology: An Introduction*. Blackwell Science Ltd., Oxford.
14. N.P. Revbech, J. Sorensen. 1990. *Denitrification in Soil and Sediment*. Plenum Press, London.

15. S.A. Waksman. 1963. *Soil Microbiology*. John Wiley & Sons Inc., New York.
16. B.E. Rittmann, P.I. McCarty. 2001. *Environmental Biotechnology: Principles and Application*. McGraw-Hill Book Co., Singapore.
17. Ilmu Alam Net. 2016. *Pengertian Amonia NH3*. <http://ilmualam.net/pengertian-amonia-nh3.html> tanggal 1 Maret 2016 diakses tgl 15 Agustus 2016 jam 13.50 WIB.
18. Ibrahim, M. 2007. *Mikrobiologi Prinsip dan Aplikasi*. Surabaya; Unesa University Press.
19. M.S. Coyne. 1999. *Soil Microbiology: An Exploratory Approach*. Delmer Publisher: Washington.
20. M. Christensson, E. Lie, W. Thomas. 1994. A comparison between methanol and ethanol as carbon source for denitrification. *Water Science and Technology* 30 (6): 83-90.
21. B.H.L. Kelso, R.V. Smith, R.C. Laughlin. 1999. Effect of carbon substances on nitrite accumulation in freshwater sediment. *Applied and Environmental Microbiology* 65 (1): 61-66.

PENGELOLAAN LIMBAH RADIOAKTIF HASIL DEKONTAMINASI DI INSTALASI PRODUKSI RADIOISOTOP PASKA BERHENTI OPERASI

Suhaedi Muhammad¹, Nazaroh², Rr. Djarwanti, RPS³

^{1,2}Pusat Teknologi Keselamatan Dan Metrologi Radiasi, Kawasan Nuklir Pasar Jum'at

³Pusat Teknologi Radioisotop Dan Radiofarmaka, Kawasan Nuklir Serpong

E-mail : suhaedi.muhammad62@gmail.com

ABSTRAK

PENGELOLAAN LIMBAH RADIOAKTIF HASIL DEKONTAMINASI DI INSTALASI PRODUKSI RADIOISOTOP PASKA BERHENTI OPERASI. Instalasi produksi radioisotop dan radiofarmaka (IPRR) merupakan salah satu instalasi yang dalam kegiatan operasinya dapat menimbulkan dampak radiologi tinggi. Instalasi ini jika terlalu lama tidak melakukan kegiatan operasi akibat adanya kerusakan baik pada sistem VAC maupun kerusakan sistem filtrasi dapat mengakibatkan terjadinya dampak radiologi baik bagi masyarakat maupun lingkungan sekitar instalasi. Untuk mencegah terjadinya gangguan kesehatan, maka pihak pemegang izin (PI) bertanggungjawab untuk melakukan perbaikan sistem VAC, sistem filtrasi dan melakukan dekontaminasi daerah kerja secara menyeluruh. Kegiatan dekontaminasi daerah kerja di IPRR secara menyeluruh paska berhenti beroperasi akan menghasilkan banyak limbah radioaktif baik padat terbakar, padat terkompaksi, padat tak terbakar dan tak terkompaksi maupun cair. Untuk itu diperlukan pengelolaan secara dan benar sesuai dengan ketentuan yang ditetapkan di dalam Peraturan Pemerintah Nomor 61 Tahun 2013 tentang Pengelolaan Limbah Radioaktif. Kegiatan pengelolaan limbah radioaktif yang diperlukan meliputi penyediaan sarana dan perlengkapan, penempatan wadah penampung limbah radioaktif, inventarisasi dan pengumpulan limbah radioaktif, reduksi volume limbah radioaktif, pewadahan limbah radioaktif dan pelabelan, penyimpanan sementara dan pengiriman limbah radioaktif. Selanjutnya untuk mengetahui seberapa besar dampak radiologi yang dialami oleh pekerja radiasi yang melakukan kegiatan pengelolaan limbah, PI dapat memperkirakan besarnya dosis yang diterima oleh pekerja radiasi tanpa harus menunggu hasil evaluasi TLD-badge. Sedangkan untuk mengetahui ada tidaknya kontaminasi interna dilakukan pemeriksaan dengan menggunakan *whole body counter* (WBC). Pemeriksaan WBC ini difokuskan pada ada tidaknya aktivitas I-131 dan Cs-137 di dalam tubuh pekerja radiasi.

Kata Kunci : dekontaminasi, pengelolaan, limbah radioaktif

ABSTRACT

RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT, AS A RESULT OF DECONTAMINATION OF INSTALLATION OF RADIOISOTOPE AND RADIOPHARMACEUTICALS AFTER POST OPERATION. Currently, Installation of Production of Radioisotopes and Radiopharmaceuticals (IPRR) not conduct operations due to damage to the VAC and filtration systems. IPRR is one of the installation which in its operations can lead to high radiological consequences. To prevent radiological consequences and health problems to workers and the surrounding communities, a license holder (PI) must repair VAC and filtration systems, conduct decontamination work area and perform waste management. Decontamination activities will produce solid radioactive waste, compacted solid, solid unburned and non compacted and liquid radioactive waste. Waste management should be in accordance with Government Regulation No. 61 Year 2013 on the Management of Radioactive Waste. In the radioactive waste management required the provision of facilities and equipment, the placement of radioactive waste container vessel, inventory and collection of radioactive waste, radioactive waste volume reduction, measurement of exposure and contamination, labeling, temporary storage and shipment of radioactive waste to PTLR-BATAN. To anticipate the radiological impact on the radiation workers who perform decontamination and waste management, PI should apply management doses. To determine the internal contamination in the radiation workers, the PI must check the radiation worker using Whole Body Counter (WBC).

Keywords: decontamination, management, radioactive waste

PENDAHULUAN

Instalasi produksi radioisotop dan radiofarmaka (IPRR) yang sudah lama tidak beroperasi dengan kondisi sistem VAC dan sistem filtrasi yang mengalami kerusakan dapat mengakibatkan terjadinya dampak radiologi yang berkepanjangan. Dampak radiologi yang

dimaksud dapat berupa laju paparan radiasi, kontaminasi udara dan kontaminasi permukaan.

Untuk mencegah terjadinya gangguan kesehatan baik bagi masyarakat maupun lingkungan sekitar maka pihak pemegang izin berkewajiban melakukan serangkaian perbaikan baik sistem VAC maupun sistem filtrasi dan dekontaminasi daerah kerja di IPRR secara

menyeluruh. Dekontaminasi daerah kerja secara menyeluruh di sini mencakup daerah kerja radioisotop, daerah kerja radiofarmaka, daerah kerja kendali kualitas, daerah kerja pengemasan dan daerah kerja penunjang.

Dekontaminasi daerah kerja di IPRR secara menyeluruh ini akan menghasilkan berbagai jenis limbah radioaktif baik padat terbakar, padat terkompaksi, padat tak terbakar dan tak terkompaksi maupun cair.

Agar limbah radioaktif yang dihasilkan dari kegiatan dekontaminasi di IPRR paska berhenti operasi ini tidak menimbulkan dampak radiologi baik bagi pekerja, masyarakat sekitar maupun lingkungan maka harus dikelola dengan baik sesuai dengan ketentuan pengelolaan limbah radioaktif serta sesuai dengan ketentuan proteksi dan keselamatan radiasi.

Lingkup kegiatan pengelolaan limbah radioaktif yang dihasilkan dari kegiatan dekontaminasi di IPRR paska berhenti operasi ini di dalamnya meliputi : penyiapan sarana dan perlengkapan, penempatan wadah penampung limbah, inventarisasi dan pengumpulan limbah, reduksi volume limbah, pewadahan limbah, penyimpanan sementara dan pengiriman limbah. Selanjutnya untuk mengetahui seberapa besarnya dampak radiologi yang akan dialami oleh para pekerja radiasi perlu dibuat perkiraan besarnya dosis yang diterima dan dilakukannya pemeriksaan dosis interna melalui pemeriksaan *whole Body Counting (WBC)*.

METODOLOGI

Bahan dan peralatan yang digunakan untuk pelaksanaan kegiatan pengelolaan limbah radioaktif yang dihasilkan dari kegiatan dekontaminasi di IPRR paska berhenti operasi ini terdiri dari : perlengkapan proteksi radiasi personil, sarana untuk penampungan limbah (drum ukuran 100 liter, kantong plastik limbah, tangki penampungan limbah dan jerigen), sarana dan perlengkapan untuk pemeriksaan kontaminasi permukaan wadah limbah, label pengiriman wadah limbah, surveymeter radiasi, sarana dan perlengkapan untuk penyimpanan sementara dan sarana serta perlengkapan untuk pengiriman limbah.

Sedangkan metode yang digunakan adalah :

1. Inventarisasi dan kategorisasi jenis limbah radioaktif.
2. Pengukuran laju paparan radiasi.
3. Reduksi volume limbah radioaktif.
4. Pewadahan limbah radioaktif.
5. Pelabelan wadah limbah radioaktif.

HASIL DAN PEMBAHASAN

JENIS DAN ASAL LIMBAH RADIOAKTIF HASIL DEKONTAMINASI

Pelaksanaan kegiatan dekontaminasi daerah kerja di lingkungan IPRR secara menyeluruh paska berhenti beroperasi akan menghasilkan banyak limbah radioaktif sesuai dengan jenis dan kategori limbah sebagai berikut :

1. Limbah hasil dekontaminasi daerah kerja radioisotop, terdiri dari :
 - a. Berasal dari lorong depan dan belakang ruang keselamatan berupa bahan dekontaminasi dan kertas filter hasil tes usap dengan kategori padat terbakar dan kategori aktivitas rendah, air hasil dekontaminasi dengan kategori aktivitas rendah.
 - b. Berasal dari ruang ganti pakaian radioisotop berupa *shoe cover* dan/atau sepatu lab, masker, tutup kepala, jas lab dan *coverall* dengan kategori padat terbakar dan kategori aktivitas sedang dan tinggi.
 - c. Berasal dari ruang *Gallery Hot Cell* dan ruang penyiapan bahan baku berupa bahan dekontaminasi dan kertas filter hasil tes usap dengan kategori padat terbakar dan kategori aktivitas rendah dan sedang, air hasil dekontaminasi dengan kategori aktivitas rendah dan sedang.
 - d. Berasal dari ruang analisa sampel berupa bahan dekontaminasi dan kertas filter hasil tes usap dengan kategori padat terbakar dan kategori aktivitas sedang, air hasil dekontaminasi dengan kategori aktivitas sedang.
 - e. Berasal dari ruang *Hot Cell Service Area* dan *Truck-bay* berupa bahan dekontaminasi dan kertas filter hasil tes usap dengan kategori padat terbakar dan kategori aktivitas tinggi serta air hasil dekontaminasi dengan kategori aktivitas tinggi.
 - f. Berasal dari lorong antara ruang *Gallery Hot Cell* dan ruang perakitan *Generator Tc-99m* berupa bahan dekontaminasi dan kertas filter hasil tes usap dengan kategori padat terbakar dan kategori aktivitas rendah, air hasil dekontaminasi dengan kategori aktivitas rendah.
 - g. Berasal dari ruang penyiapan target uranium dan ruang perbaikan sistem *master slave manipulator* berupa bahan dekontaminasi dan kertas filter hasil tes usap dengan kategori padat terbakar dan kategori aktivitas rendah, air hasil

- dekontaminasi dengan kategori aktivitas rendah.
- h. Berasal dari lorong antara ruang penyiapan target uranium dan ruang perbaikan sistem *master slave manipulator* berupa bahan dekontaminasi dan kertas filter hasil tes usap dengan kategori padat terbakar dan kategori aktivitas rendah, air hasil dekontaminasi dengan kategori aktivitas rendah.
 - i. Berasal dari ruang produksi Fosfor-32 berupa bahan dekontaminasi dan kertas filter hasil tes usap dengan kategori padat terbakar dan kategori aktivitas tinggi serta air hasil dekontaminasi dengan kategori aktivitas tinggi.
 - j. Berasal dari lorong bagian belakang ruang produksi Fosfor-32 berupa bahan dekontaminasi dan kertas filter hasil tes usap dengan kategori padat terbakar dan kategori aktivitas rendah serta air hasil dekontaminasi dengan kategori aktivitas rendah.
2. Limbah hasil dekontaminasi daerah kerja radiofarmaka, terdiri dari :
- a. Berasal dari lorong depan ruang ganti pakaian radiofarmaka berupa bahan dekontaminasi dan kertas filter hasil tes usap dengan kategori padat terbakar dan kategori aktivitas rendah, air hasil dekontaminasi dengan kategori aktivitas rendah.
 - b. Berasal dari ruang penyiapan komponen dan bahan baku berupa bahan dekontaminasi dan kertas filter hasil tes usap dengan kategori padat terbakar dan kategori aktivitas rendah, air hasil dekontaminasi dengan kategori aktivitas rendah.
 - c. Berasal dari ruang perakitan *Generator Tc-99m* berupa bahan dekontaminasi dan kertas filter hasil tes usap dengan kategori padat terbakar dan kategori aktivitas rendah dan sedang, air hasil dekontaminasi dengan kategori aktivitas rendah dan sedang.
 - d. Berasal dari ruang bagian belakang *Hot Cell Generator Tc-99m* berupa bahan dekontaminasi dan kertas filter hasil tes usap dengan kategori padat terbakar dan kategori aktivitas tinggi serta air hasil dekontaminasi dengan kategori aktivitas tinggi.
 - e. Berasal dari ruang produksi senyawa bertanda berupa bahan dekontaminasi dan kertas filter hasil tes usap dengan kategori padat terbakar dan kategori aktivitas sedang dan tinggi serta air hasil dekontaminasi dengan kategori aktivitas sedang dan tinggi.
- f. Berasal dari ruang pengemasan produk radiofarmakaberupa bahan dekontaminasi dan kertas filter hasil tes usap dengan kategori padat terbakar dan kategori aktivitas rendah dan sedang, air hasil dekontaminasi dengan kategori aktivitas rendah dan sedang.
 - g. Berasal dari ruang pembongkaran *Generator Tc-99m* berupa bahan dekontaminasi dan kertas filter hasil tes usap dengan kategori padat terbakar dan kategori aktivitas sedang dan tinggi serta air hasil dekontaminasi dengan kategori aktivitas sedang dan tinggi.
3. Limbah hasil dekontaminasi daerah kerja kendali kualitas, terdiri dari :
- a. Berasal dari lorong depan ruang pemeriksaan kualitas produk radioisotope dan radiofarmaka berupa bahan dekontaminasi dan kertas filter hasil tes usap dengan kategori padat terbakar dan kategori aktivitas rendah, air hasil dekontaminasi dengan kategori aktivitas rendah.
 - b. Berasal dari ruang pemeriksaan kualitas produk radioisotop dan radiofarmaka berupa bahan dekontaminasi dan kertas filter hasil tes usap dengan kategori padat terbakar dan kategori aktivitas tinggi serta air hasil dekontaminasi dengan kategori aktivitas tinggi.
 - c. Berasal dari lorong depan ruang kamera gamma berupa bahan dekontaminasi dan kertas filter hasil tes usap dengan kategori padat terbakar dan kategori aktivitas rendah, air hasil dekontaminasi dengan kategori aktivitas rendah.

PENYIAPAN SARANA DAN PERLENGKAPAN

Pengelolaan limbah radioaktif hasil dekontaminasi daerah kerja di IPRR memerlukan sarana dan perlengkapan yang minimal terdiri dari [1,2] :

1. Perlengkapan kerja dan perlengkapan proteksi radiasi personil seperti jas lab, baju apron, shoe cover atau sepatu lab, sarung tangan, masker (masker 3M dan/atau fullface), tutup kepala, kacamata timbal (Pb) dan perlengkapan lain yang diperlukan.
2. Monitor personil (*TLD-badge* dan atau *pocket dosimeter*).
3. *Surveymeter* radiasi dan *surveymeter* kontaminasi.
4. Drum ukuran 100 liter dengan tutup menggunakan sistem pengunci (ring).

5. Kantong plastik limbah untuk melapisi bagian dalam drum ukuran 100 liter.
6. Jerigen tahan asam untuk penyimpanan limbah radioaktif cair.
7. Tangki untuk menampung limbah cair hasil dekontaminasi.
8. Ruang tempat penyimpanan sementara limbah radioaktif.
9. *Shielding* radiasi dapat berupa lembaran Pb atau batu bata Pb (*leadbreak*).
10. Tang penjepit
11. Rambu-rambu radiasi, tiang statif dan rantai kuning.
12. Label kategori limbah .
13. Label pengiriman limbah.

Sarana dan perlengkapan tersebut di atas harus sudah dipastikan secara lengkap sebelum kegiatan penanganan limbah radioaktif dimulai. Khusus untuk drum ukuran 100 liter, bagian dalamnya terlebih dahulu dilapisi dengan kantong plastik limbah dimana masing-masing drum sudah diberi identitas sesuai dengan kategori limbah radioaktif yang akan ditampung (padat terbakar, padat terkompaksi serta padat tak terbakar dan tak terkompaksi).

PENEMPATAN WADAH PENAMPUNGAN LIMBAH RADIOAKTIF

Untuk memudahkan kegiatan penanganan limbah radioaktif, sebelum kegiatan

dekontaminasi daerah kerja dilakukan, wadah tempat penampungan limbah radioaktif terlebih dahulu sudah harus ditempatkan di lokasi yang telah ditentukan di daerah kerja yang akan didekontaminasi.

INVENTARISASI DAN PENGUMPULAN LIMBAH RADIOAKTIF

Limbah radioaktif yang dihasilkan dari pelaksanaan kegiatan dekontaminasi daerah kerja di IPRR yang sudah tertampung di dalam wadah limbah terlebih dahulu harus dicek apakah penampungannya sudah sesuai dengan kategori limbahnya atau belum. Apabila masih ada limbah yang tercampur, terlebih dahulu harus disortir dan harus dimasukkan ke dalam wadah limbah sesuai dengan kategorinya. Sedangkan untuk limbah cair hasil dekontaminasi tertampung di dalam tangki limbah radioaktif dan jerigen 20 liter.

Limbah radioaktif yang sudah terkumpul di dalam wadah sesuai dengan kategorinya dipindahkan ke ruang *truchbay* yang lantainya sudah dilapisi dengan plastik lembaran guna dilakukan penanganan lebih lanjut.

Contoh hasil inventarisasi dan pengumpulan limbah radioaktif hasil dekontaminasi diberikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Contoh Hasil Inventarisasi Dan Pengumpulan Limbah Radioaktif

No.	Asal Limbah	Inventarisasi Dan Pengumpulan Limbah			
		Limbah Padat Terbakar	Limbah Padat Terkompaksi	Limbah Padat Tak terbakar dan tak terkompaksi	Limbah Cair
01. Daerah Radioisotop					
01.	Loby depan	Drum 100 L	Drum 100 L	-	Jerigen 20 L
02.	Lorong depan R-33	Drum 100 L	Drum 100 L	-	Jerigen 20 L
03.	Lorong belakang R-33	Drum 100 L	Drum 100 L	-	Jerigen 20 L
04.	Change room RI	Drum 100 L	Drum 100 L	-	Tangki limbah
05.	<i>Gallery Hot Cell</i>	Drum 100 L	Drum 100 L	Drum 100 L	Tangki limbah
06.	Analisa sampel	Drum 100 L	Drum 100 L	Drum 100 L	Tangki limbah
07.	Penyiapan bahan	Drum 100 L	Drum 100 L	Drum 100 L	Tangki limbah
08.	<i>Hot Cell Service Area</i>	Drum 100 L	Drum 100 L	Drum 100 L	Tangki limbah
09.	Lorong <i>plating</i>	Drum 100 L	Drum 100 L	-	Tangki limbah
10.	Lorong Analisa U	Drum 100 L	Drum 100 L	-	Tangki limbah
11.	Produksi P-32(R-28)	Drum 100 L	Drum 100 L	Drum 100 L	Tangki limbah
12.	Lorong depan R-28	Drum 100 L	Drum 100 L	-	Tangki limbah
13.	<i>Truckbay</i>	Drum 100 L	Drum 100 L	Drum 100 L	Tangki limbah
02. Daerah Radiofarmaka					
01.	Lorong depan R-38	Drum 100 L	Drum 100 L	-	Tangki limbah
02.	Change room RF	Drum 100 L	Drum 100 L	-	Tangki limbah
03.	Ruang 39	Drum 100 L	Drum 100 L	Drum 100 L	Tangki limbah

04.	Perakitan Generator	Drum 100 L	Drum 100 L	Drum 100 L	Tangki limbah
05.	Belakang HC Gen.Tc.	Drum 100 L	Drum 100 L	Drum 100 L	Tangki limbah
06.	Produksi SB	Drum 100 L	Drum 100 L	Drum 100 L	Tangki limbah
07.	Lorong 1 R-42&43	Drum 100 L	Drum 100 L	-	Tangki limbah
08.	Lorong 2 R-42&43	Drum 100 L	Drum 100 L	-	Tangki limbah
09.	Assembly Gen.Tc/R-41	Drum 100 L	Drum 100 L	Drum 100 L	Tangki limbah
10.	Depan R-41	Drum 100 L	Drum 100 L	Drum 100 L	Tangki limbah
11.	Pengemasan	Drum 100 L	Drum 100 L	Drum 100 L	Tangki limbah
12.	Lorong pengemasan	Drum 100 L	Drum 100 L	-	Tangki limbah
13.	Gudang Generator Tc.	Drum 100 L	Drum 100 L	Drum 100 L	Tangki limbah
02. Daerah Kendali Kualitas					
01.	Lorong kendali kualitas	Drum 100 L	Drum 100 L	-	Jerigen 20 L
02.	Ruang 53	Drum 100 L	Drum 100 L	Drum 100 L	Tangki limbah
03.	Ruang 54	Drum 100 L	Drum 100 L	Drum 100 L	Tangki limbah
04.	Ruang 55	Drum 100 L	Drum 100 L	Drum 100 L	Tangki limbah
05.	Lorong kandang	Drum 100 L	Drum 100 L	-	Jerigen 20 L
06.	Lorong gamma camera	Drum 100 L	Drum 100 L	-	Jerigen 20 L

REDUKSI VOLUME LIMBAH RADIOAKTIF

Agar pengiriman limbah radioaktif dapat dilakukan secara efektif dan optimal, limbah yang sudah tertampung di dalam wadah dilakukan reduksi volume dengan cara sebagai berikut [1,2] :

1. Untuk limbah padat terbakar, reduksi volume dilakukan dengan cara dimampatkan sehingga isinya benar-benar optimal.
2. Untuk limbah padat terkompaksi, reduksi volume dilakukan dengan cara dikompaksi dengan menggunakan alat kompaktor sehingga isinya benar-benar optimal.
3. Untuk limbah padat tak terbakar dan tak terkompaksi, reduksi volume dilakukan dengan cara diatur pewadahnya sedemikian hingga isinya benar-benar optimal.

PEWADAHAN, PELABELAN, PENGUKURAN LAJU PAPARAN RADIASI DAN PEMERIKSAAN KONTAMINASI PERMUKAAN

Wadah limbah (drum) yang telah berisi penuh limbah radioaktif baik padat terbakar, padat terkompaksi maupun padat tak terbakar dan tak terkompaksi sebelum ditutup rapat terlebih dahulu dilakukan :

1. Pengukuran laju paparan radiasi oleh petugas proteksi radiasi baik pada permukaan maupun pada jarak 1 meter dari permukaan. Bila nilai laju paparan radiasi pada permukaan wadah nilainya lebih dari 200 mR/jam, maka limbah

yang ada di dalam wadah harus dikurangi sampai laju paparan radiasi pada permukaan wadahnya kurang dari 200 mR/jam. Setelah itu wadah limbah ditutup rapat dengan sistem kunci (ring). Begitupun untuk limbah radioaktif cair yang ada di dalam jerigen.

2. Tes usap pada permukaan wadah (bagian samping dan bagian tutup). Jika nilai tingkat kontaminasinya melebihi 3,7 Bq/cm² maka wadah yang berisi limbah harus didekontaminasi sampai benar-benar aman.

Selanjutnya wadah yang berisi limbah radioaktif diberi label pada bagian sampingnya sesuai dengan ketentuan pengiriman limbah radioaktif ke PTLR-BATAN. Pada label pengiriman limbah radioaktif minimal berisi informasi : nomor identitas wadah limbah radioaktif, nama institusi pengirim limbah radioaktif, jenis dan kategori limbah radioaktif, nilai laju paparan radiasi baik pada permukaan wadah maupun pada jarak satu meter, tanggal pengukuran dan tandatangan PPR. Label ini harus terpasang dengan kuat sehingga tidak mudah lepas bila wadah yang berisi limbah radioaktif ini akan disimpan sementara di gudang limbah.

PENYIMPANAN SEMENTARA WADAH BERISI LIMBAH RADIOAKTIF

Jika wadah yang berisi limbah radioaktif tidak akan segera dikirim, maka harus disimpan sementara di tempat yang telah ditentukan yang tidak mengakibatkan terjadinya kontaminasi pada wadah limbah tersebut (dapat dilakukan di ruang *truckbay*).

Penempatan wadah limbah di dalam tempat penyimpanan sementara (*truckbay*) harus diatur sedemikian hingga nilai laju paparan radiasi pada permukaan dinding (yang menghadap gedung instalasi radiometalurgi) dan pintu (*rolling door*) tidak mengakibatkan adanya nilai dosis melebihi 1 mSv/tahun (nilai dosis untuk masyarakat umum).

ANALISA SAMPEL LIMBAH RADIOAKTIF CAIR

Sebelum dilakukan pengiriman limbah radioaktif cair, terlebih dahulu harus dilakukan pengambilan sampel limbah dari tangki penampungan untuk keperluan analisa guna mengetahui jenis dan kandungan aktivitas yang ada di dalam limbah tersebut. Analisa sampel limbah radioaktif cair dilakukan dengan menggunakan *Multy Channel Analyzer*(MCA).

PENGIRIMAN LIMBAH RADIOAKTIF

Pengiriman wadah yang berisi limbah radioaktif hasil dekontaminasi daerah kerja di IPRR paska berhenti beroperasi harus mengikuti ketentuan pengiriman limbah radioaktif

sebagaimana yang ditetapkan di dalam Peraturan Pemerintah Nomor 61 Tahu 2013 tentang Pengelolaan Limbah Radioaktif. Pihak pemegang izin terlebih dahulu harus mengirim surat secara resmi kepada Kepala Pusat Teknologi (PTLR) perihal rencana pengiriman limbah radioaktif dengan menyebutkan jenis dan jumlah limbah yang akan dikirim serta tanggal pelaksanaan pengirimannya. Mengingat pengiriman limbah radioaktif ke PTLR dilakukan di dalam lingkungan pagar kuning, maka tidak diperlukan persetujuan pengiriman zat radioaktif dari BAPETEN [3].

PERKIRAAN PENERIMAAN NILAI DOSIS

Untuk mengetahui seberapa besar dampak radiologi yang dialami oleh para pekerja yang terlibat di dalam kegiatan pengelolaan limbah radioaktif hasil dekontaminasi daerah kerja di IPRR paska berhenti beroperasi, PI harus menerapkan sistem manajemen penerimaan dosis. Besarnya nilai dosis eksterna yang diterima oleh pekerja radiasi selain dapat diketahui melalui hasil evaluasi TLD-badge juga dapat diperkirakan secara teoritis dengan menggunakan persamaan berikut [2] :

$$\text{Dosis} = \frac{\text{Waktu Kerja} \times \text{Paparan Radiasi}}{6000}$$

dimana dosis dalam satuan mSv, paparan radiasi dalam satuan mR/jam, waktu kerja dalam satuan menit serta 6000 merupakan faktor konversi dari mR ke mSv dan dari jam ke menit.

Contoh pencatatan perkiraan besarnya nilai dosis eksterna yang diterima oleh pekerja radiasi yang terlibat dalam kegiatan pengelolaan limbah radioaktif diberikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Contoh Pencatatan Perkiraan Penerimaan Dosis Eksterna

No.	Tahapan Kegiatan	Nama Personil	Waktu Kerja (Menit)	Laju Paparan (mR/jam)		Perkiraan Nilai Dosis (mSv)
				Latar	Hasil	
01.	Inventarisasi dan pengumpulan limbah radioaktif					
02.	Reduksi volume limbah radioaktif.					
03.	Pewadahan dan pelabelan.					
04.	Penyimpanan sementara.					
05.	Analisa sampel limbah cair					
06.	Pengiriman limbah.					

Pemegang izin disamping harus melakukan upaya perkiraan besarnya nilai dosis eksterna yang diterima oleh pekerja radiasi, juga harus menetapkan kebijakan bahwa semua pekerja radiasi yang terlibat dalam kegiatan pengelolaan limbah radioaktif harus menjalani pemantauan

dosis interna melalui pemeriksaan dengan menggunakan *whole body counter* (WBC).

Pemegang izin harus melakukan evaluasi terhadap hasil pemantauan dosis interna melalui pemeriksaan dengan WBC [2,4]:

1. Jika dari hasil pemeriksaan WBC ada pekerja radiasi yang menerima aktivitas

- I-131 sebesar 140 nCi, maka terhadap yang bersangkutan harus dilakukan tindaklanjut sesuai ketentuan fisika kesehatan yakni harus meminum tablet Kalium Iodida tiga kali dalam sehari. Pekerja radiasi baru dinyatakan aman jika dari hasil pemeriksaan WBC nilai aktivitas I-131 nya kurang dari 70 nCi [2,.
2. Jika dari hasil pemeriksaan WBC ada pekerja radiasi yang menerima aktivitas Cs-137 sebesar 10 nCi, maka terhadap yang bersangkutan harus dilakukan tindaklanjut sesuai ketentuan fisika kesehatan yakni harus meminum larutan *Frussian Blue* yang dicampur dengan 1 sendok air dengan dosis : mula-mula 1 gram, 4 jam kemudian 5 gram dan 4 jam berikutnya 5 gram lagi. Pekerja radiasi baru dinyatakan aman jika dari hasil pemeriksaan WBC nilai aktivitas Cs-137 nya kurang dari 1,5 nCi.

KESIMPULAN

Dari uraian tersebut di atas dapat disimpulkan bahwa :

1. Kegiatan dekontaminasi daerah kerja di IPRR paska berhenti beroperasi akan menghasilkan banyak limbah radioaktif baik dalam bentuk padat terbakar, padat terkompaksi, padat tak terbakar dan tak terkompaksi maupun limbah radioaktif cair.
2. Dari beberapa daerah kerja yang ada di lingkungan IPRR, limbah yang berasal dari daerah dengan tingkat kontaminasi tinggi (baik padat terbakar, padat terkompaksi maupun cair) ternyata berasal dari ruang *Hot Cell Service Area*, ruang produksi P-32 (ruang 28), ruang *Truckbay*, ruang belakang *Hot Cell Generator Tc-99m*, ruang analisa kualitas produk (ruang 54) dan ruang pembongkaran *Generator Tc-99m*.
3. Kegiatan pengelolaan limbah radioaktif hasil dekontaminasi daerah kerja di IPRR paska berhenti beroperasi dapat menimbulkan dampak radiologi dalam bentuk penerimaan dosis radiasi eksternal dan internal. Untuk mengantisipasi adanya dampak radiologi yang diterima oleh pekerja radiasi, besarnya dosis eksternal yang diterima tidak harus menunggu hasil evaluasi TLD-badge tapi dapat diperkirakan secara teoritis yang berdasarkan pengalaman penulis yang telah melakukan kajian penerimaan dosis pekerja radiasi di IPRR penyimpangannya paling besar sekitar 5 % bila dibandingkan dengan hasil evaluasi TLD-badge.
4. Zat kontaminan yang ada di IPRR yang umumnya jadi penyebab kontaminasi internal bagi pekerja radiasi adalah I-131 dan Cs-137 sehingga evaluasi dosis internal difokuskan pada dua zat kontaminan tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

1. Medhi Physics, "Radioisotope and Radiopharmaceutical Production Intallation", USA, 1985.
2. Medhi Physics, "Health Physics ", USA, 1985.
3. Sekretariat Negara, "Peraturan Pemerintah No. 61 Tahun 2013 Tentang Pengelolaan Limbah Radioaktif ", Jakarta, 2013.
4. Richmond, C.R., "Accelerating The Turnover of Internally Deposited Radiocaesium ", Diagnosis and Treatment of Deposited Radionuclides (Kornberger, H.A., Norwood, W.D., eds), Excerpta Medica Foundation, New York, (1968), 315.

PEMANFATAN LIMBAH OLI BEKAS SEBAGAI BAHAN BAKAR PEMBANTU PELEDAKAN (ANFO) PADA KEGIATAN PERTAMBANGAN BATUBARA (Kasus Pemanfaatan Limbah Oli Bekas di PT. JMB Group)

Danang Widiyanto

Mahasiswa Program Pascasarjana Kajian Ilmu Lingkungan Universitas Indonesia
Jalan Salemba Raya Nomor 4, Jakarta Pusat, Indonesia.

Email: danangsdll@gmail.com

ABSTRAK

PEMANFAATAN LIMBAH OLI BEKAS SEBAGAI BAHAN BAKAR PEMBANTU PELEDAKAN (ANFO) PADA KEGIATAN PERTAMBANGAN BATUBARA (Kasus Pemanfaatan Limbah Oli Bekas di PT. JMB Group). Industri pertambangan batubara di Indonesia semakin meningkat sejalan dengan meningkatnya kebutuhan manusia akan energi. Industri pertambangan menghasilkan limbah oli bekas yang jumlahnya cukup besar yang memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai substitusi solar dalam pembuatan ANFO namun banyak pelaku industri pertambangan yang belum memanfaatkan limbah oli bekasnya karena belum mengetahui manfaat lingkungan, ekonomi dan sosialnya. Penelitian ini bertujuan menganalisis manfaat lingkungan, ekonomi dan social dari kegiatan pemanfaatan limbah oli bekas sebagai bahan bakar pembantu peledakan (ANFO). Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif dan kualitatif yaitu survei, wawancara mendalam dan kuesioner. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kegiatan pemanfaatan oli bekas sejak tahun 2012-2015 dapat mengurangi limbah oli bekas sebesar 3.585.233,33 liter, menghemat bahan bakar fosil sebesar 3.887.602,41 liter dan memberikan keuntungan ekonomi bagi industri dalam hal efisiensi biaya sebesar Rp.38.876.024.096 dari tahun 2012 sampai 2015 dengan nilai NPV>0 serta meningkatkan pengetahuan dan perilaku pekerja dalam hal pengelolaan limbah. Kegiatan ini mendukung pembangunan berkelanjutan sektor pertambangan.

Kata Kunci : pertambangan, pemanfaatan limbah, pembangunan berkelanjutan

ABSTRACT

UTILIZATION OF USED OIL AS FUEL HELPER (ANFO) FOR BLASTING ACTIVITY IN COAL MINING (Cased Used Oil Utilization in PT. JMB Group). Coal mining industry in Indonesia is increasing in line with the growing human need for energy. The mining industry generates hazardous and toxic waste as used oil that is quite significant. Used oil from mining industries has the potential to be used as a fuel mixture auxiliary blasting (ANFO) but there are still many perpetrators of the mining industry that have not been utilizing used oil because not enough understanding the environmental, economic and social benefits of used oil utilization. This research aims to analyse the environmental, economic and social benefits of used oil utilization in the manufacture of ANFO. This research was carried out by applying a quantitative approach with quantitative and qualitative methods by undertaking survey, in-depth interviews and questionnaires. The results of this research present that used oil utilization has environmental benefits that can reduce amounted to 3,585,233.33 liters of used oil, saving on fossil fuels amounted to 3,887,602.41 liters and provides economic benefits to the industry in terms of operational cost efficiency Rp. 38,876,024,096 from 2012 until 2015 with NPV>0 and improved the knowledge and behavior of workers in terms of waste management. Thirdly benefits derived from used oil utilization supporting sustainable development in the mining sector.

Keywords :mining, waste utilization, sustainable development

PENDAHULUAN

Industri pertambangan batubara di Indonesia semakin meningkat sejalan dengan meningkatnya kebutuhan manusia akan energi. Produksi batubara Indonesia relatif meningkat setiap tahun, pertumbuhan produksi batubara di Indonesia sekitar 14% pertahun (KESDM, 2014) [1]. Produksi batubara yang meningkat ini menuntut penambahan peralatan operasional tambang. Semua peralatan operasional untuk aktivitas pertambangan menghasilkan limbah oli bekas yang termasuk dalam kategori limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3) menurut Peraturan Pemerintah Nomor 101 tahun 2014 tentang Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya

dan Beracun. Jumlah limbah oli bekas yang dihasilkan setiap tahunnya pada kegiatan pertambangan cukup besar.

Menurut Setiyono (2001) dampak yang ditimbulkan oleh limbah B3 yang dibuang langsung ke lingkungan sangat besar dan dapat bersifat akumulatif, sehingga dampak tersebut akan berantai mengikuti proses pengangkutan (sirkulasi) bahan dan jaring-jaring rantai makanan [2]. Mengingat besarnya resiko yang ditimbulkan tersebut perlu dilakukan pengelolaan limbah B3 secara menyeluruh, terpadu dan berkelanjutan.

Konsep pengelolaan limbah telah bergeser dari tindakan pengelolaan limbah yang bersifat

penanggulangan terhadap limbah yang keluar dari proses produksi atau dikenal sebagai *end of pipe treatment*, menjadi *in front of the pipe* atau pencegahan. Tindakan pencegahan tersebut dalam bentuk prinsip 3R yaitu reduksi pada sumber (*reduction*), pemakaian kembali (*reuse*), dan daur ulang (*recycle*) serta minimalisasi limbah yaitu upaya mengurangi volume, konsentrasi, toksisitas, dan tingkat bahaya limbah yang berasal dari proses produksi dengan jalan reduksi pada sumbernya dan atau pemanfaatan limbah (Soerjani, 2002)[3].

Menurut Kurniawati (2010) bahwa prinsip hirarki pengelolaan limbah adalah suatu prinsip yang memberikan pedoman tentang tahapan-tahapan dalam pengelolaan limbah mulai dari yang lebih prioritas hingga prioritas paling rendah [4] seperti ditunjukkan pada Gambar 1.

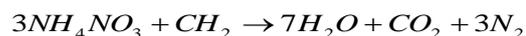


Gambar 1. Bagan 6-M dalam Hirarki Pengelolaan Limbah
Sumber: Kurniawati (2010)

Pada kegiatan penambangan batubara dengan metode tambang terbuka, kegiatan awal yang dilakukan adalah kegiatan pengupasan batuan penutup (*overburden*). Untuk menunjang proses pengupasan batuan penutup tersebut, dapat menggunakan metode pengeboran atau peledakan untuk membongkar batuan penutup (Hartman, 2002) [5].

Kegiatan peledakan bertujuan untuk membongkar batuan penutup dengan menggunakan bahan peledak sehingga dapat diambil batubaranya. Bahan peledak untuk kegiatan pembongkaran batuan penutup yang umum digunakan adalah *Ammonium Nitrate Fuel Oil* (ANFO). *Ammonium Nitrate Fuel Oil* (ANFO) adalah salah satu dari sekian banyak jenis bahan baku peledakan dimana komponen terbesarnya terdiri atas *Ammonium Nitrate* (AN) yang dicampur dengan bahan bakar atau *fuel oil* (FO) dengan komposisi pada umumnya AN 94% dan *fuel oil* 6% (Moorthy, 2012) [6]. *Fuel oil*

yang umum digunakan adalah bahan bakar solar. Menurut SNI Nomor 7642 (2010) bahwa komposisi AN 94,5% dan solar 5,5 % dengan reaksi kimia seperti persamaan berikut [7]:



Menurut Thomas *et al.* (2015) bahwa komposisi ANFO yang tepat dengan AN=94,3% dan FO=5,7% akan diperoleh *zero oxygen balance*[8].

Menurut Ruhe (1999) bahan bakar yang digunakan sebagai bahan pembuat ANFO dapat dicampur dengan oli bekas sehingga dapat mengurangi penggunaan bahan bakar [9]. Menurut SNI Nomor 7642 (2010) campuran oli bekas dengan solar dapat dilakukan dengan perbandingan maksimum 80% : 20% [7]. Menurut Hakim *et al.* (2011) dengan menggunakan geometri peledakan yang sama didapatkan bahwa semakin tinggi kenaikan komposisi penggunaan oli bekas sebagai bahan substitusi solar dalam pembuatan bahan peledak ANFO, maka ukuran fragmentasi hasil peledakan semakin besar [10]. Jika hal ini diterapkan, maka limbah oli bekas yang dihasilkan kegiatan pertambangan dapat dimanfaatkan sebagai bahan pencampur pembuatan ANFO.

International Council on Mining and Metals (2003) telah menyusun sepuluh prinsip pengelolaan pertambangan berkelanjutan [11]. Dalam sepuluh prinsip pengelolaan pertambangan berkelanjutan menyebutkan bahwa kegiatan pertambangan harus memfasilitasi dan mendorong desain produksi, penggunaan, penggunaan kembali (*reuse*), daur ulang (*recycling*) dan pembuangan produk secara bertanggung jawab. Menurut Zulkifli (2014) kegiatan pemanfaatan limbah bahan berbahaya dan beracun yang dilakukan oleh industri pertambangan adalah salah satu upaya untuk mencapai tujuan pengelolaan tambang berkelanjutan. [12]

Menurut Dubinski (2013) bahwa pelaksanaan pembangunan berkelanjutan pada kegiatan pertambangan berarti integrasi dari kegiatan di tiga bidang utama, yaitu [13]:

- Teknis dan ekonomi, yang memastikan pertumbuhan ekonomi,
- Ekologi, yang menjamin perlindungan sumber daya alam dan lingkungan,
- Sosial, yang berarti memperhatikan pengembangan karyawan di tempat kerja atau pengembangan masyarakat di daerah pertambangan.

Menurut Ruhe *et al.* (1996) penggunaan oli bekas untuk pembuatan ANFO dapat menghemat energi, mengurangi impor oli, dan mengurangi biaya operasional. Minimisasi limbah adalah perangkat penting dalam manajemen bisnis untuk menciptakan lingkungan bisnis yang

kompetitif dan berkelanjutan [14]. *The East Anglian Waste Minimisation* dalam proyek industri makanan dan minuman mengemukakan beberapa keuntungan minimisasi limbah dalam bisnis yaitu (Hyde *et al.*, 2000 dalam Poonprasit, 2005) [15]:

1. Penurunan biaya operasional per unit produk,
2. Perbaikan profit perusahaan,
3. Perbaikan daya saing,
4. Perbaikan *image* perusahaan dan kepercayaan *stakeholder*,
5. Meningkatkan profil manajemen,
6. Memperkuat *team work* dan budaya perusahaan.

Menurut Berkel (2007) bahwa keberhasilan program yang dilakukan oleh perusahaan dipengaruhi oleh pengetahuan dan perilaku dari pekerja [16]. Program pengelolaan limbah yang dilakukan di industri berarti dipengaruhi oleh kondisi pekerja yang bekerja dalam mengelola limbah.

Kegiatan pemanfaatan limbah B3 berpotensi memiliki manfaat lingkungan, manfaat ekonomi dan manfaat sosial. Akan tetapi, saat ini di Indonesia, perusahaan pertambangan batubara yang memiliki izin pemanfaatan limbah B3 pelumas bekas sebagai bahan bakar pembantu peledakan (ANFO) untuk kegiatan pertambangan hanya 4 perusahaan (KLHK, 2014) [17].

Rumusan Masalah

Limbah oli bekas yang dihasilkan industri pertambangan, memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai campuran bahan bakar pembantu peledakan (ANFO). Namun, permasalahan yang terjadi masih banyak pelaku industri pertambangan batubara belum memanfaatkan oli bekasnya sebagai campuran bahan bakar dalam proses pembuatan ANFO untuk kegiatan peledakannya karena belum mengetahui manfaat lingkungan, ekonomi dan sosial dari kegiatan pemanfaatan limbah oli bekas padahal kegiatan pemanfaatan limbah ini berpotensi untuk mendukung terwujudnya kegiatan pertambangan yang berkelanjutan.

Pertanyaan Penelitian

Rumusan masalah tersebut menghasilkan pertanyaan penelitian: 1) Bagaimana manfaat lingkungan dari pemanfaatan limbah oli bekas sebagai campuran bahan bakar pembantu peledakan (ANFO) pada tambang batubara? 2) Bagaimana manfaat ekonomi (bagi industri) dari pemanfaatan limbah oli bekas sebagai campuran bahan bakar pembantu peledakan (ANFO) pada tambang batubara? 3) Bagaimana manfaat sosial (pengetahuan dan perilaku pekerja dalam hal pengelolaan limbah pada kegiatan

perbengkelan) akibat dari kegiatan pemanfaatan limbah oli bekas?

Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk: 1) Menganalisis manfaat lingkungan dari pemanfaatan limbah oli bekas sebagai campuran bahan bakar pembantu peledakan (ANFO) pada tambang batubara. 2) Menganalisis manfaat ekonomi (bagi industri) dari pemanfaatan limbah oli bekas sebagai campuran bahan bakar pembantu peledakan (ANFO) pada tambang batubara.

3) Menganalisis manfaat sosial (pengetahuan dan perilaku pekerja dalam hal pengelolaan limbah pada kegiatan perbengkelan) akibat dari kegiatan pemanfaatan limbah oli bekas.

METODOLOGI

Penelitian ini dilaksanakan dengan pendekatan kuantitatif menggunakan metode kuantitatif dan kualitatif (*mixed method*). Lokasi penelitian adalah salah satu perusahaan pertambangan batubara yang telah melakukan pemanfaatan limbah oli bekas untuk bahan bakar pembantu peledakan yaitu PT. JMB Group yang terletak di Kabupaten Kutai Kartanegara, Provinsi Kalimantan Timur. Populasi dalam penelitian ini adalah:

1. Populasi pertama adalah semua karyawan departemen *Safety, Health, and Environment* PT. JMB Group sebanyak 10 orang. Pemilihan sampel untuk populasi kedua dilakukan dengan metode *Purposive Sampling*. Jumlah responden yang berhasil diambil pada penelitian ini sebanyak 5 responden. Responden yang terpilih tersebut telah memenuhi kriteria sebagai berikut:
 1. Mengisi posisi strategis dalam struktur organisasi, sekurang-kurangnya jabatan supervisor.
 2. Memahami proses pemanfaatan limbah oli bekas sebagai bahan pencampur peledakan (ANFO).
 3. Memiliki pengetahuan tentang pengelolaan lingkungan.
 4. Berpendidikan minimal sarjana.
2. Populasi kedua adalah semua pekerja bagian *maintenance* di bengkel subkontraktor PT. JMB Group, sebanyak 360 orang. Responden untuk populasi pertama akan ditentukan dengan menggunakan rumus *Slovin* (Setiawan, 2007) [18], yaitu:

$$n = \frac{N}{1 + (N \times e^2)}$$

Keterangan:

n = jumlah elemen/anggota sampel

N = jumlah elemen/anggota populasi

$e = \text{error level (7,9\%)}$

Pada perhitungan menggunakan rumus Slovin, populasi yang berjumlah 360 orang, jumlah responden yang diambil pada penelitian 110 orang.

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh peneliti dari pihak perusahaan melalui kuesioner. Data sekunder diperoleh dari pihak perusahaan melalui hasil wawancara, observasi lapangan, kuesioner serta studi literatur. Metode analisis data yang digunakan untuk menjawab tujuan penelitian adalah dengan menggunakan analisis deskriptif dan analisis matematis dengan perhitungan Nilai Sekarang Bersih (*Net Present Value*).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pembahasan dimulai dengan latar belakang lokasi penelitian yang dilanjutkan dengan membahas hasil analisis manfaat lingkungan, ekonomi dan sosial dari kegiatan pemanfaatan limbah oli bekas sebagai bahan bakar pembantu peledakan pada kegiatan pertambangan batubara.

Lokasi Penelitian

PT. JMB Group adalah salah satu perusahaan swasta yang bergerak dalam bidang pertambangan batubara dengan sistem tambang terbuka yang terletak di Kecamatan Tenggarong Seberang, Kabupaten Kutai Kartanegara, Kalimantan Timur. Lokasi tambang PT. JMB Group terletak sekitar 40km di sebelah utara Kota Samarinda. PT. JMB Group adalah operator dari 4 Blok Izin Usaha Pertambangan dengan total luas wilayah kerja 12.871 ha yang terdiri atas PT. KRA (2.465 ha), PT. ABE (3.409 ha), PT. JMB (4.099 ha) dan PT. JMB-P (2.898 ha). Saat ini hanya 3 blok Izin Usaha Pertambangan yang sudah masuk tahap Operasi Produksi yaitu PT. JMB, PT. KRA dan PT. ABE, sedangkan untuk PT. JMB-P masih tahapan eksplorasi.

PT. JMB Group telah melakukan kegiatan pemanfaatan limbah oli bekas sejak tahun 2012 dan memperoleh izin pemanfaatan di tahun tersebut. Kegiatan penambangan PT. JMB Group menggunakan metode tambang terbuka, dimana untuk melakukan kegiatan pembongkaran batuan penutup dengan metode peledakan. Kegiatan peledakan yang dilakukan di PT. JMB Group menggunakan bahan peledak *Ammonium Nitrat Fuel Oil* (ANFO).

Manfaat Lingkungan Kegiatan Pemanfaatan Limbah Oli Bekas

Kegiatan penambangan PT. JMB Group menggunakan metode tambang terbuka, dimana

untuk melakukan kegiatan pembongkaran batuan penutup dengan melakukan kegiatan peledakan. Kegiatan peledakan yang dilakukan di PT. JMB Group menggunakan bahan peledak *Ammonium Nitrat Fuel Oil* (ANFO). Kegiatan pembongkaran batuan penutup ini dilakukan untuk pengambilan bahan galian batubara yang ada di bawahnya. Kegiatan produksi batubara dan pembongkaran batuan penutup yang dilakukan di PT. JMB Group disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Produksi Batubara dan Batuan Penutup PT. JMB Group

No.	TAHUN	PRODUKSI PT. JMB GROUP		
		BATUAN PENUTUP (BCM)	BATUBARA (Ton)	SR
1	2012	105.302.316	8.084.371	13,03
2	2013	88.607.782	8.093.354	10,95
3	2014	66.892.568	6.635.537	10,08
4	2015	59.355.260	5.354.294	11,09
JUMLAH		320.157.926	28.167.556	11,37

Sumber: PT JMB Group (2016)

Kegiatan operasional PT. JMB Group mayoritas menggunakan peralatan berat seperti *dump truck*, *excavator*, dan *loader*. Selain itu, kegiatan operasional tambang juga menggunakan kendaraan kecil seperti *light vehicle* dan kendaraan pendukung lainnya yang menghasilkan limbah oli bekas.

Kegiatan produksi batubara PT. JMB Group sejak tahun 2012-2015 mengalami penurunan produksi yang disebabkan penurunan harga komoditas batubara, begitu juga dengan kegiatan pengupasan tanah penutup dari tahun 2012-2015 menurun dari tahun 2012 seperti disajikan pada Tabel 1. Limbah oli bekas yang dihasilkan jumlahnya cukup besar seperti disajikan pada Tabel 2. Limbah tersebut dimanfaatkan sebagai campuran bahan bakar untuk pembuatan *Ammonium Nitrat Fuel Oil* (ANFO).

Tabel 2. Rekapitulasi Pemanfaatan Oli Bekas PT. JMB Group

TAHUN	Oli Bekas Dihilangkan (Ton)	Oli Bekas JMB Dimanfaatkan (Ton)	Oli Bekas Diserahkan ke Pihak III (Ton)	Presentase Pemanfaatan Oli Bekas (%)
2012	1.982,46	949,79	1.032,68	47,91
2013	1.260,17	546,01	714,16	43,33
2014	1.218,52	1.041,92	320,86	85,51
2015	1.189,48	688,99	500,49	57,92
Total	5.650,63	3.226,71	2.568,19	57,10
Rata-rata	1.412,66	806,68	642,05	57,10

Sumber: Data sekunder yang diolah (2016)

Berdasarkan data pada Tabel 2 rata-rata jumlah oli bekas yang dapat dimanfaatkan di PT. JMB Group sejak tahun 2012-2015 sebesar 57,1% dari limbah yang dihasilkan pertahunnya. Pemanfaatan paling banyak dilakukan pada tahun 2014 yang mencapai 85,51% dari limbah oli bekas yang dihasilkan. Sisa limbah oli bekas yang tidak termanfaatkan diserahkan kepada pengumpul limbah B3 yang berijin untuk diolah. Jumlah limbah oli bekas yang dapat dimanfaatkan sejak tahun 2012 hingga tahun 2015 adalah sebesar 3.226,71 ton atau setara 3.585.233,33 liter.

Kegiatan pengelolaan limbah oli bekas yang dilakukan oleh PT. JMB Group adalah pemanfaatan limbah dengan cara “memperoleh kembali” (*recovery*), yaitu perolehan kembali komponen-komponen yang bermanfaat dalam oli bekas dengan proses kimia dan termal sehingga dapat mensubsitisi penggunaan solar dalam pembuatan ANFO. Hal ini mendukung pendapat Kurniawati (2010) bahwa langkah kelima dalam hirarki pengelolaan limbah adalah pemanfaatan limbah dengan “memperoleh kembali” (*recovery*) yaitu perolehan kembali komponen-komponen yang bermanfaat dengan proses kimia, fisika, biologi, dan/atau termal [4].

Kegiatan pemanfaatan limbah oli bekas sebagai bahan bakar pembantu peledakan (ANFO) ini pada dasarnya adalah melakukan subsitisi bahan bakar solar menggunakan limbah oli bekas dengan pencampuran maksimum 80% oli bekas dan 20% untuk solar. Subsitusi oli bekas sebagai bahan bakar dalam pembuatan ANFO ini secara tidak langsung menghemat penggunaan bahan bakar solar sebesar jumlah oli bekas yang dimanfaatkan untuk pembuatan ANFO. Data Pembuatan *Fuel Oil* untuk ANFO disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Rekapitulasi Pembuatan *Fuel Oil* untuk ANFO PT. JMB Group

Tahun	Oli Bekas Dimanfaatkan (Ton)	Pemakaian Solar (Ton)	Pembuatan Fuel Oil (Solar+Oli) untuk ANFO (Ton)	Rasio Oli Bekas : Solar (%)	
				Oli	Solar
2012	949,79	619,15	1.568,94	61%	39%
2013	546,01	355,33	901,34	61%	39%
2014	1.041,92	270,76	1.312,68	79%	21%
2015	688,99	273,01	962,00	72%	28%
Total	3.226,71	1.518,25	4.744,96		

Sumber: Data sekunder yang diolah (2016)

Berdasarkan Tabel 3 menunjukkan bahwa solar yang digunakan untuk pembuatan *fuel oil* dapat disubsitisi sebesar 3.226,71 ton atau setara 3.887.602,41 liter solar. Perbandingan campuran oli bekas dan solar dalam pembuatan

fuel oil di PT. JMB Group belum mencapai komposisi maksimal yaitu 80% oli bekas dan 20% solar. Komposisi oli bekas dan solar maksimal yang dapat dilakukan oleh PT. JMB Group perbandingannya adalah 72% oli bekas dan 28% solar, hal ini disebabkan karena PT. JMB Group masih ingin melihat kualitas hasil peledakan dari program pemanfaatan limbah oli bekas ini sebagai substitusi solar untuk pembuatan ANFO serta dampaknya pada lingkungan.

Menurut Hakim *et al.* (2011) bahwa dengan menggunakan geometri peledakan yang sama didapatkan bahwa semakin tinggi kenaikan komposisi penggunaan oli bekas sebagai bahan subsitisi solar dalam pembuatan bahan peledak ANFO, maka ukuran fragmentasi hasil peledakan semakin besar [10]. Hal ini juga yang menyebabkan penggunaan oli bekas hanya sampai maksimal 80% dilakukan oleh PT. JMB Group karena hal ini menentukan ukuran fragmentasi kualitas peledakan yang diinginkan sehingga peningkatan rasio perbandingan menuju 80% oli bekas dan 20% solar dapat terus ditingkatkan setiap tahunnya sesuai izin maksimum yang diberikan dan ketentuan dalam SNI.

Berdasarkan hasil penelitian ini, penghematan solar adalah salah satu manfaat dari program pemanfaatan limbah oli bekas sebagai bahan bakar pembantu peledakan (ANFO). Hal ini sesuai dengan pendapat Ruhe *et al.* (1996) bahwa penggunaan oli bekas untuk pembuatan ANFO dapat menghemat energi dan mengurangi impor oli [14].

Manfaat Ekonomi Kegiatan Pemanfaatan Limbah Oli Bekas

Menurut Hajkowicz *et al.* (2000) metode yang digunakan untuk pengambilan keputusan kelayakan kegiatan adalah perhitungan *NPV* (*Net Present Value*) [19]. Metode perhitungan manfaat ekonomi dari pemanfaatan limbah oli bekas sebagai campuran bahan bakar pembantu peledakan (ANFO) secara umum terhadap industri dilakukan menggunakan analisis kelayakan proyek, yaitu dengan perhitungan nilai sekarang bersih atau *NPV* (*Net Present Value*). Nilai sekarang bersih (*NPV*) adalah suatu nilai yang didapat dari pengurangan antara semua biaya manfaat dengan semua biaya yang seluruhnya dinyatakan dalam nilai sekarang. Apabila *NPV* itu positif, maka dinyatakan bahwa kegiatan itu layak untuk dilaksanakan.

Biaya yang dianalisis pada kegiatan pemanfaatan oli bekas sebagai bahan bakar untuk pembuatan ANFO ini adalah biaya investasi awal, biaya tenaga kerja, dan biaya operasional berupa biaya analisis laboratorium untuk uji

kualitas oli bekas, sedangkan keuntungan atau manfaat yang dihitung adalah nilai efisiensi biaya dari subsidi bahan bakar solar dengan menggunakan limbah oli bekas.

Hasil perhitungan *Net Present Value* (NPV) dari kegiatan pemanfaatan oli bekas ini adalah menggunakan variabel sebagai berikut:

- Keuntungan yang diperoleh industri adalah nilai efisiensi dari subsidi bahan bakar solar dengan menggunakan limbah oli bekas (dimana harga bahan bakar solar industri adalah rata-rata Rp. 10.000 perliter dari tahun 2012-2015)
- Biaya yang dikeluarkan adalah biaya investasi awal, biaya upah tenaga kerja dan biaya analisis laboratorium untuk uji kualitas oli bekas.
- Suku bunga yang digunakan adalah 7% per tahun berdasarkan *BI rate* tanggal 18 Februari 2016.

Hasil perhitungan nilai *NPV* dengan suku bunga 7% pertahun dari kegiatan pemanfaatan oli bekas sebagai bahan bakar pembantu peledakan (ANFO) seperti disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Perhitungan Nilai *Net Present Value*

TAHUN	Manfaat (Rp)	Biaya (cost) (Rp)	NPV
0	0	545.694.700	(545.694.700)
1	11.443.253.012	117.026.000	10.585.258.890
2	6.578.433.735	122.911.600	5.638.503.044
3	12.553.253.012	132.120.000	10.139.344.506
4	8.301.084.337	150.750.000	6.217.851.043
			32.035.262.783

Sumber: Data sekunder yang diolah (2016)

Berdasarkan Tabel 5 dapat dilihat perhitungan *NPV* dimana nilai negatif didapatkan hanya pada tahun ke nol karena pada tahun tersebut investasi awal dibayarkan, namun pada tahun pertama dan selanjutnya sampai tahun ke empat nilai *NPV* yang didapatkan adalah positif ($NPV > 0$) sehingga dapat dikatakan bahwa proyek atau kegiatan pemanfaatan oli bekas sebagai bahan bakar pembantu peledakan dalam pembuatan ANFO layak untuk dilaksanakan.

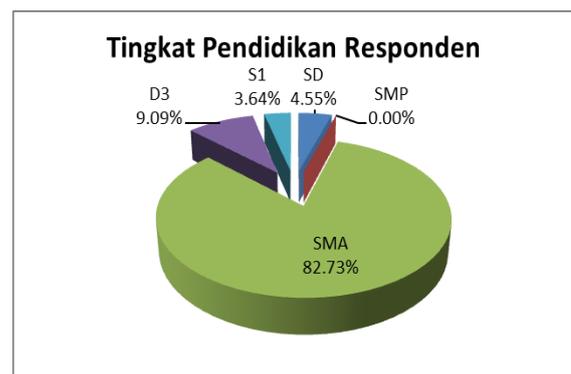
Industri rugi pada tahun ke nol (tahun 2011), hal ini disebabkan pada tahun tersebut biaya investasi dibayarkan sedangkan pengoperasian proyek ini belum dapat dijalankan karena dalam tahap menunggu izin dikeluarkan oleh Kementerian Lingkungan Hidup. Pada tahun kedua industri sudah mendapatkan keuntungan sekitar Rp. 10 Milyar setelah izin didapatkan dan proyek dijalankan dan begitu selanjutnya sampai tahun 2015. Keuntungan

didapatkan bergantung pada jumlah oli bekas yang dimanfaatkan. Hasil penelitian ini sesuai dengan Ruhe *et al.* (1996) bahwa penggunaan oli bekas untuk pembuatan ANFO dapat mengurangi biaya operasional [14].

Manfaat Sosial Kegiatan Pemanfaatan Limbah Oli Bekas

Program pemanfaatan limbah oli bekas yang dilakukan PT. JMB Group tentunya tergantung pada jumlah oli bekas yang dihasilkan dari kegiatan perbengkelan. Oli bekas yang dihasilkan kualitasnya juga tidak boleh rusak sehingga pengelolaannya harus benar pada kegiatan perbengkelan. Untuk menunjang kegiatan pemanfaatan limbah oli bekas PT. JMB Group bersama dengan subkontraktor memberikan pelatihan dan sosialisasi mengenai pengelolaan limbah pada kegiatan perbengkelan terhadap 360 pekerja dengan tujuan limbah B3 seperti oli bekas yang dihasilkan dari kegiatan perbengkelan dapat dikelola dengan baik dan dapat dimanfaatkan.

Pada penelitian ini, dilakukan analisis pengetahuan dan sikap pekerja yang berada di unit perbengkelan untuk melihat hasil dari pelatihan dan sosialisasi pengelolaan limbah di areal perbengkelan yang dilakukan perusahaan untuk menunjang program pemanfaatan limbah B3. Peneliti mendapatkan responden sebanyak 110 orang. Tingkat pendidikan responden disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Tingkat Pendidikan Responden
Sumber: Hasil survei (2016)

Berdasarkan Gambar 2 dapat diketahui bahwa responden mempunyai tingkat pendidikan Sekolah Dasar (SD) (4,55%), Sekolah Menengah Atas (SMA) (82,73%), Diploma (D3) (9,09%), dan Sarjana (S1) (3,64%). Tidak ada responden yang memiliki tingkat pendidikan Sekolah Menengah Pertama (SMP) yang terambil dan mayoritas responden memiliki pendidikan di tingkat Sekolah Menengah Atas (SMA) sebesar 82,73% dan yang paling sedikit adalah responden tingkat Sarjana (S1) sebesar 3,64%.

Tingkat pengetahuan pekerja di areal perbengkelan terkait pengelolaan limbah berdasarkan hasil penelitian disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Hasil Penilaian Pengetahuan Responden

No	Pendidikan	Jumlah Responden (orang)	Persentase Penilaian Rata-rata (%)	Kriteria Rata-rata
1	SD	5	52,00	Baik
2	SMA	91	96,37	Sangat Baik
3	D3	10	98,00	Sangat Baik
4	S1	4	100,00	Sangat Baik
Semua Responden		110	96,30	Sangat Baik

Sumber: Hasil survei (2016)

Berdasarkan Tabel 7 dapat diketahui bahwa secara keseluruhan responden memiliki tingkat pengetahuan tentang pengelolaan limbah di areal perbengkelan dengan kriteria sangat baik (96,30%) dengan kelompok tingkat pendidikan S1 memiliki persentase paling tinggi (100%) diikuti dengan kelompok D3 dan SMA diurutkan kedua dan ketiga dengan kriteria sangat baik dengan persentase penilaian rata-rata 98,00% dan 96,37%. Kelompok responden dengan tingkat pendidikan SD memiliki tingkat pengetahuan dengan kriteria baik dengan persentase penilaian rata-rata 52,00%.

Peneliti menganalisis perilaku responden dalam hal pengelolaan limbah di areal perbengkelan dan mengelompokkan hasilnya berdasarkan tingkat pendidikan seperti disajikan pada Tabel 8.

Tabel 8. Hasil Penilaian Perilaku Responden

No	Pendidikan	Jumlah Responden (orang)	Persentase Penilaian Rata-rata (%)	Kriteria Rata-rata
1	SD	5	90,00	Sangat Baik
2	SMA	91	97,14	Sangat Baik
3	D3	10	100,00	Sangat Baik
4	S1	4	100,00	Sangat Baik
Semua Responden		110	96,30	Sangat Baik

Sumber: Hasil survei (2016)

Pada Tabel 8 dapat diketahui bahwa secara keseluruhan responden memiliki perilaku dengan kriteria sangat baik (96,30%) terhadap perilaku pengelolaan limbah di areal perbengkelan. Berdasarkan tingkat pendidikannya, kelompok responden yang memiliki tingkat pendidikan S1 dan D3 memiliki persentase penilaian rata-rata paling tinggi 100% sedangkan kelompok dengan tingkat pendidikan SMA memiliki persentase penilaian rata-rata sebesar 97,14%. Kelompok responden dengan

tingkat pendidikan SD memiliki persentase penilaian paling kecil sebesar 90% tetapi masih dalam kriteria sangat baik.

Berdasarkan hasil penelitian, tingkat pengetahuan dan perilaku pekerja yang ada di areal perbengkelan PT.JMB Group dengan hasil sangat baik ini telah berhasil mensukseskan penerapan program pemanfaatan limbah oli bekas sebagai bahan bakar dalam pembuatan ANFO. Hal ini memperkuat pendapat dari Berkel (2007), yang mengatakan bahwa pengetahuan dan perilaku dari pekerja dapat mempengaruhi keberhasilan suatu program yang dilakukan oleh perusahaan [16].

Secara tidak langsung program pemanfaatan limbah oli bekas ini juga mendukung manfaat sosial lain yang didapatkan perusahaan. Hal tersebut tidak dapat dipungkiri bahwa pasar terbesar dari industri pertambangan adalah pasar berorientasi ekspor, oleh karenanya *Brand Image* yang didapatkan sebagai perusahaan yang ramah lingkungan. Hal ini sesuai dengan penelitian (Hyde *et al.*, 2000 dalam Poonprasit, 2005) bahwa keuntungan kegiatan minimisasi limbah dalam bisnis salah satunya adalah perbaikan *image* perusahaan dan kepercayaan *stakeholder*[15].

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis data dan pembahasan didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

- Kegiatan pemanfaatan limbah oli bekas ini memiliki manfaat lingkungan, dan ekonomi dan sosial sehingga mendukung upaya pembangunan berkelanjutan di sektor pertambangan.
- Kegiatan pemanfaatan limbah oli bekas sebagai bahan bakar pembantu peledakan (ANFO) memiliki manfaat lingkungan, yaitu dapat mengurangi limbah oli bekas sebesar 3.585.233,33 liter dan menghemat sumber energi fosil (solar) sebesar 3.887.602,41 solar selama 4 tahun kegiatan pemanfaatan.
- Kegiatan pemanfaatan limbah oli bekas sebagai bahan bakar pembantu peledakan (ANFO) layak dijalankan dan memberikan keuntungan bagi industri tambang sebesar Rp. 32.035.262.783 selama 4 tahun pemanfaatan.
- Kegiatan pemanfaatan limbah oli bekas sebagai bahan bakar pembantu peledakan (ANFO) meningkatkan pengetahuan dan perilaku pekerja dalam hal pengelolaan limbah serta industri mendapatkan brand image sebagai industri pertambangan yang ramah lingkungan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas berkat rahmat dan karunia-Nya sehingga jurnal ini dapat selesai dengan baik. Penulis menyadari bahwa tanpa bimbingan dan dorongan berbagai pihak, penelitian ini sangatlah sulit untuk diselesaikan. Oleh karena itu, melalui kesempatan ini penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada:

1. Dr. dr. Tri Edhi Budhi Soesilo, M.Si dan Dr. Lana Saria, M.Si selaku pembimbing penelitian yang telah banyak membimbing, mengarahkan dan memberi masukan dalam menyelesaikan penelitian ini;
2. Pihak Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral yang telah memberikan beasiswa untuk menyelesaikan studi dan penelitian ini.
3. Pihak PT. JMB Group yang telah banyak membantu dalam proses penelitian.
4. Keluarga, rekan-rekan Program Studi Ilmu Lingkungan, Universitas Indonesia dan rekan kerja yang telah memberikan bantuan kerja sama, rasa pengertian dan dukungan moril lainnya sehingga penelitian ini dapat diselesaikan.

DAFTAR PUSTAKA

3. Kementerian ESDM. Laporan Data Produksi Batubara. Jakarta. (2014).
4. Setiyono. Dasar hukum pengelolaan limbah B3. *Jurnal Teknologi Lingkungan, Vol.2, No. 1*, (2001)72-77.
5. Soerjani, M. *Ekologi manusia*. Pusat Penerbitan Universitas Terbuka. Jakarta. (2002).
6. Kurniawati, D.S. Pemanfaatan limbah padat pabrik kelapa sawit sebagai bahan bakar alternatif sumber energi listrik. Universitas Indonesia. (2010). Jakarta.
7. Hartman, H. *Introductory mining engineering 2nd Edition*. John Wiley & Sons Inc. (2002).
8. Moorthy, N., Hazwani, H., & Phang, C.C. Identification of fuel oil in absorbent and non-absorbent surfaces in a site of Ammonium Nitrate-Fuel Oil (ANFO) blast. *Malaysian Journal of Forensic Sciences*, (2012) 3(1).
9. Standar Nasional Indonesia (SNI) Nomor 7642 Tahun 2010. Tata cara pemanfaatan limbah oli bekas untuk campuran ammonium nitrat dengan *fuel oil* pada tambang terbuka. Jakarta. (2010).
10. Thomas, A., Eyitayo, I., Oluwaseun, O. Design and fabrication ANFO mixing machine for safety and proper homogenization. *Innovative Systems Design and Engineering Journal* Vol.6, No.5 (2015).
11. Ruhe, T.C., Bajpayee, T.S. (1999). Thermal stability of ANFO made with recycled oil. <http://www.cdc.gov/niosh/mining/UserFiles/works/pdfs/anfo.pdf>. 30 Juni 2015, pk. 10.05 WIB.
12. Akim R.N., Kartini. Kajian prosentase campuran *fuel oil* menggunakan oli bekas dalm komposisi bahan peledak ANFO. Prosiding Seminar Nasional Fakultas Teknik UNLAM. (2011).
13. International Council on Mining and Metals. (2003). 10 principles. <https://www.icmm.com/our-work/sustainable-development-framework/10-principles>. 24 Mei 2015, pk.21.15 WIB.
14. Zulkifli, A. *Pengelolaan tambang berkelanjutan*. Yogyakarta: Graha ilmu. (2014)
15. Ubinski, J. Sustainable development of mining mineral resources. *Journal of Sustainable Mining Vol. 12, No.1*, (2016) pp 1-6.
16. Ruhe, T.C., Bajpayee, T.S. (1996). Low temperatue limit for mixing recycled oil, diesel fuel and ammonium nitrate to make ANFO - type blasting gents. <http://www.cdc.gov/niosh/mining/UserFiles/works/pdfs/anfo.pdf>. 24Mei 2015, pk. 22.15 WIB.
17. Poonprasit, M., Philips, P S., Smith, A., Wirojanagud, W., Naseby, D. *The Application of Waste Minimisation to Business Management to Improve Environmental Performance in the Food and Drink Industry*.(2005)
18. Berkel, R. Van. Cleaner Production and Eco-Efficiency Initiatives in Western Australia 1996-2004. *Journal of Cleaner Production*, 15, (2007) 741-755.
19. Kementerian Lingkungan Hidup. Data Perizinan Pemanfaatan Limbah. Jakarta. (2014).
20. Setiawan, N. Penentuan ukuran sampel memakai rumus Slovin dan Tabel Krejcie Morgan: telaah konsep dan aplikasinya. Universitas Padjadjaran. Bandung. (2007).
21. Ajkowicz, S., Young, M., Wheeler, S., MacDonald,D.H.,& Young D. *Supporting Decisions Understanding Natural Resource Management Assessment Techniques*. CSIRO Land and Water. (2000).

SISTEM PEMURNIAN HELIUM PADA REAKTOR DAYA EXPERIMENTAL (RDE) TIPE HTR-10

Aisyah, Yuli Purwanto

Pusat Teknologi Limbah Radioaktif-Badan Tenaga Nuklir Nasional
Kawasan Puspipstek Serpong Gedung 50, Tangerang Selatan, Banten 15310
Email: aisyah@batan.go.id

ABSTRAK

SISTEM PEMURNIAN HELIUM PADA REAKTOR DAYA EXPERIMENTAL (RDE) TIPE HTR-10. Saat ini Indonesia sedang merencanakan pemanfaatan energi nuklir bagi pembangunan nasionalnya. Ini ditengarai dari rencana Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) yang akan membangun RDE type HTR dengan daya 10 MWth. Pada reaktor tipe ini terdapat Sistem Purifikasi yang berfungsi melayani penyediaan helium dengan kemurnian tinggi sebagai pendingin reaktor. Sistem Purifikasi merupakan salah satu sistem pendukung yang penting dengan radioaktivitas tinggi karena keberadaan beberapa jenis radionuklida hasil fisi maupun aktivasi, dan karenanya harus ditangani dengan baik. Telah dilakukan kajian Sistem Purifikasi Gas Helium berdasarkan Spek-Tek HTR yang didapat dari perusahaan yang menawarkan produknya kepada BATAN, Dokumen terbitan *International Atomic Energy Agency* (IAEA), Publikasi dari para Peneliti dan *Expert* asing, serta hasil diskusi dengan beberapa Narasumber dalam berbagai Workshop. Tujuan dari kajian ini adalah mempelajari sistem purifikasi reaktor tipe HTR termasuk didalamnya mempelajari asal radionuklida hasil fisi maupun aktivasi yang menembus lapisan *triso* dan masuk kedalam Sistem Pendingin Reaktor sehingga memerlukan pemurnian terhadap pendingin. Dalam operasional HTR terdapat 2 unit Sistem Purifikasi, yaitu yang beroperasi dalam kondisi normal dan yang beroperasi dalam kondisi terjadi kegagalan maupun pada regenerasi sistem pendingin. Radionuklida yang menembus lapisan *triso* yang kemudian masuk kedalam pendingin (helium) diantaranya Cs-137 dan Sr-90, selain itu juga Xe-133, I-131, Kr-85, Kr-87, Kr-88, dan H-3 yang menembus struktur dan konstruksi *triso* secara difusi. Metoda yang digunakan dalam Sistem Purifikasi Gas Helium harus mampu menghilangkan kontaminan radionuklida tersebut sehingga dapat menyediakan gas helium dengan kemurnian tinggi sebagai pendingin HTR.

Kata Kunci: RDE tipe HTR-10, pendingin gas helium, bahan bakar *pebble*, pemurnian helium

ABSTRACT

HELIUM PURIFICATION SYSTEM IN THE EXPERIMENTAL POWER REACTOR of HTR-10 TYPE. Currently, Indonesians being planned utilization of nuclear energy for national development. This was indicated from the intention of National Nuclear Energy Agency (BATAN) which currently is planning to build a HTR of HTR type with power of 10 MWth. In HTR type reactors there is a Coolant Purification System that function to serve supplying of high purity helium as rector coolant. Helium Purification System is an important and a highly activity system because of the existance of many radionuclides produced from fission and activation, and therefore this system must be managed properly. A study in Helium purification system has been performed based on HTR's technical specification provided by the HTR sellers who promoted their product to BATAN, the documents published by the International Atomic Energy Agency (IAEA), the publication of foreign researchers and experts as well as sources discussed in many workshops. The purpose of this study was to understand the HTR purification system including the origin of radionuclides which are diffuses into the reactor coolant sytem through the *triso* layers so requires purification of the coolant. There are two units of purification system, one operates under normal reactor operation and the other operates in the event of failure or regeneration of reactor cooling system. The radionuclide contaminants penetrating *triso* layer into the coolant are Cs-137 and Sr-90, both are fission product, and the other Xe-133, I-131, Kr-85, Kr-87, Kr-88, and H-3 which are produced from material activation; all diffuse through the structure/construction of the *triso* into the coolant. The method applied in Helium Purification System should be able to remove such contaminants so as to provide a high purity Helium that performs as reactor coolant of HTRs.

Keywords : RDE type HTR-10, Helium gas cooled, Pebble fuel, Helium purification

PENDAHULUAN

Indonesia secara bertahap telah melakukan pemanfaatan teknologi nuklir dalam berbagai bidang. Indonesia dalam hal ini Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) telah memiliki 3 buah reaktor riset yaitu Reaktor Serba Guna GA Siwabessy di Serpong, Reaktor Kartini

yang berada di Yogyakarta dan Reaktor Triga Mark II yang berlokasi di Bandung. Reaktor reaktor tersebut dimanfaatkan untuk kegiatan penelitian dan pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi nuklir. Selain itu Reaktor GA Siwabessy juga digunakan untuk produksi radioisotop diantaranya Mo-99. Limbah radioaktif yang merupakan bagian konsekwensi

dari pemanfaatan teknologi nuklir juga telah mampu dikelola dengan baik oleh BATAN dengan memenuhi standart IAEA. Pusat Teknologi Pengelolaan Limbah Radioaktif (PTLR) - BATAN telah mampu mengelola seluruh limbah radioaktif yang ditimbulkan dari berbagai industri, rumah sakit dan penelitian dan pengembangan yang menggunakan bahan radioaktif diseluruh wilayah Indonesia [1].

Berdasarkan pengalaman negara maju dan juga pengalaman BATAN dalam mengoperasikan reaktor beserta laboratorium pendukungnya, maka BATAN berencana membangun sebuah reaktor daya mini guna menyongsong penerimaan masyarakat terhadap keselamatan operasi PLTN. Berdasarkan Keputusan Presiden No.5 Tahun 2000 bahwa PLTN merupakan program yang harus dilaksanakan dimana PLTN diharapkan mampu memasok energi nasional sebesar 2% [1,2]. Demikian juga berdasarkan Undang-undang No. 17 Tahun 2007 tentang Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional (RPJMN) bahwa PLTN harus segera beroperasi dalam waktu dekat. Jadi sudah sepatutnyalah BATAN berencana membangun reaktor daya mini yang bertenaga 10 MW sebelum mengoperasikan PLTN dengan daya yang lebih besar.

Beberapa negara yang sampai dengan saat ini telah dan terus mengembangkan pengoperasian reaktor generasi IV yaitu reaktor *High Temperature Gas Cooled Reactors* (HTGR) antara lain [3].

1. Tiongkok mengoperasikan reaktor HTGR, bahan bakar bentuk *pebble* dengan daya 10 MWth yang mencapai tingkat kritis pada tahun 2000.
2. Jepang dengan bahan bakar bentuk prismatic dengan daya 40 MWth dan mencapai kritis pada Tahun 1999
3. Afrika selatan dengan bahan bakar bentuk *pebble* dan daya 400 MWth yang memulai konstruksi Tahun 2007 dan beroperasi pada Tahun 2012
4. Rusia dengan bahan bakar bentuk prismatic dan daya 290 MWe
5. Belanda dengan reaktor kecil dan bahan bakar *pebble*
6. Jerman dengan daya 300 MWe dan bahan bakar bentuk *pebble*

Reaktor daya mini yang akan segera dibangun adalah Reaktor Daya Eksperimental (RDE) tipe *High Temperature Reactor* 10 MW *thermal* (HTR-10). *High Temperature Reactor* merupakan salah satu kandidat untuk pembangkit listrik masa depan dan aplikasi panas untuk industri. Rencana pembangunan RDE tipe HTR-10 telah disetujui dan masuk dalam RPJMN Bappenas tahun 2015-2019 [4]. Rencananya

RDE akan dibangun di Kawasan PUSPIPTEK Serpong [4].

Reaktor RDE tipe HTR-10 adalah reaktor yang mempunyai daya termal 10 MW berbahan bakar kernel yang mengandung uranium diperkaya 17 % U-235, dan berpendingin primer gas helium (He) [5]. Sistem pendingin primer yang menggunakan gas helium memerlukan gas helium dengan tingkat kemurnian yang tinggi untuk menjaga agar reaktor suhu tinggi ini dapat beroperasi dengan baik dan selamat. Oleh karena itu sistem purifikasi gas helium merupakan sistem pendukung yang sangat penting pada operasional RDE tipe HTR-10. Dalam operasionalnya, akan ditimbulkan hasil fisi, aktivasi dan debu debu grafit yang mengotori gas helium dan ini memerlukan pemurnian agar pasokan gas helium sebagai pendingin reaktor RDE dapat sesuai dengan spesifikasinya. Suatu instalasi pemurnian gas helium disamping memurnikan gas helium dari kontaminan kontaminan yang terdapat dalam teras reaktor juga sistem ini menyediakan pasokan gas helium murni untuk pendingin primer RDE.

Tujuan mempelajari sistem purifikasi reaktor RDE tipe HTR-10 adalah untuk mempelajari aliran limbah yang ditimbulkan dari sistem purifikasi helium ini seperti timbulnya berbagai kontaminan dalam teras reaktor yang masuk kedalam sistem pendingin reaktor sehingga memerlukan pemurnian terhadap pendingin helium. Melalui sistem purifikasi helium ini dapat diketahui jenis limbah yang ditimbulkannya.

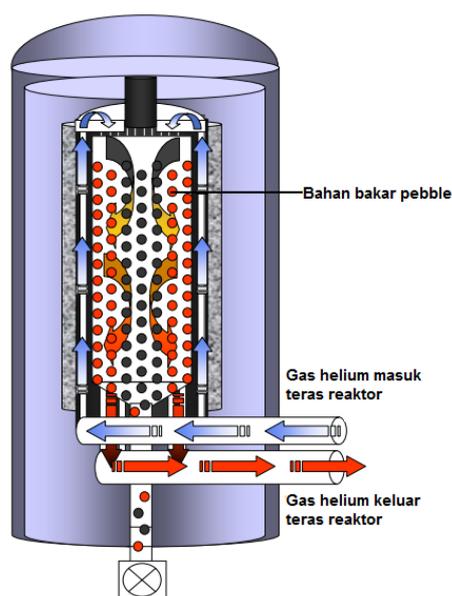
Makalah ini akan membahas masalah sistem purifikasi gas helium sebagai pendingin primer RDE tipe HTR-10 sebagai data pendukung juga dibahas tentang RDE tipe HTR-10 dan bahan bakar *pebble*.

Reaktor Daya Ekperimental Tipe HTR-10

Reaktor daya yang rencananya akan dibangun oleh BATAN mengacu pada reaktor HTGR yang dioperasikan oleh Tiongkok yang mencapai kondisi kritis pada Tahun 2000 [3]. Sesuai dengan spesifikasinya, RDE yang akan dibangun memiliki daya 10 MW termal dengan bahan bakar kernel uranium oksida yang diperkaya rendah (LEU) 17%. Teras reaktor berisi 27.000 buah *pebble* yang terdiri dari 14.310 elemen *pebble* kernel (bahan bakar) dan 12.690 *pebble* grafit (sebagai moderator). Target burn up bahan bakar adalah 80.000 MWd/tHM. Untuk spesifikasi yang terkait dengan pembangkitan uap bahwa air masuk dan keluar pembangkit uap masing masing 160 dan 530°C. Pada sistem pembangkit uap, panas yang

digunakan untuk pembangkitan uap berasal dari gas helium yang keluar dari teras reaktor pada suhu 700 °C. Gas helium yang telah mengambil panas dari reaktor kemudian dialirkan ke pembangkit uap untuk menghasilkan uap yang selanjutnya uap dialirkan ke steam-turbin dengan skema seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Terkait dengan sistem pembangkit uap, bahwa kapasitas perpindahan panas yang terjadi sebesar 10,5 MJ/dt dengan suhu air masuk ke pembangkit uap 160°C dan tekanan 75 bar dengan laju alir massa 3,61 kg/dt. Uap yang dihasilkan memiliki suhu 530°C dan bertekanan 60 Bar[3,6-9].

Pendingin gas He akan bersinggungan dengan bahan bakar *pebble* dalam teras reaktor, kemudian gas helium ini akan mengambil panas dari fisi bahan bakar uranium *pebble*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1[3].



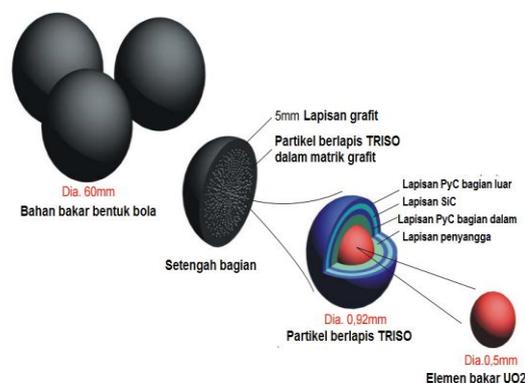
Gambar 1. Aliran pendingin gas helium dalam teras reaktor [3].

Pada Gambar 1 terlihat bahwa gas helium mengalir ke dalam teras reaktor yang berisi bahan bakar *pebble* dan *pebble* grafit [3]. Teras reaktor memiliki volume 5 m³ dan dialiri gas He, yang bertekanan 30 bar. Suhu gas helium masuk dan keluar teras reaktor masing-masing 245 dan 700 °C dengan kecepatan alir massa gas He 4,4 kg/detik. Sebagai moderator digunakan grafit yang berbentuk *pebble*. Grafit digunakan sebagai moderator karena mempunyai konduktivitas termal yang tinggi seperti logam sehingga partikel triso dapat dengan mudah mentransfer panas reaksi peluruhan dari bahan bakar kernel menuju gas helium dengan

melewati lapisan-lapisannya. Kemudahan transfer panas juga didukung dengan nilai rasio yang besar antara luas permukaan dan volume sehingga beda suhu yang tinggi antar lapisan triso dicegah [5,6,]. Material grafit berfungsi juga sebagai moderator pada bahan bakar kernel dan juga dimanfaatkan sebagai struktur penyangga dari partikel bahan bakar triso. Boron-10 ditambahkan ke dalam moderator grafit sebagai penyerap neutron, penambahan boron diikuti dengan penambahan litium-7

Bahan Bakar RDE Tipe HTR-10

Sesuai dengan spesifikasinya dalam operasional RDE tipe HTR-10 digunakan bahan bakar bahan bakar kernel yang mempunyai struktur partikel berlapis triso (*triso coated particle*) yang terdispersi dalam matriks grafit. Bahan bakar ini berbentuk *pebble* dengan struktur lapisan triso seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2[3,10,11,12,13]



Gambar 2. Bahan bakar kernel, partikel berlapis triso [3,10,11,12,13]

Beberapa negara yang mengoperasikan HTGR dengan bahan bakar bentuk *pebble* diantaranya adalah China, Afrika Selatan sedangkan. Selain bahan bakar bentuk *pebble* terdapat juga beberapa negara yang menggunakan bahan bakar bentuk prisma dalam operasional HTGR nya seperti Jepang, Rusia dan Jerman [3].

Pada bahan bakar yang berbentuk *pebble* dengan struktur berlapis triso maka terdapat beberapa lapisan pada bahan bakar kernel yaitu lapisan pertama adalah bahan bakar kernel yang mengandung UO₂ yang dilapisi moderator keramik dan grafit. Bahan bakar berada pada posisi sentral dengan diameter 450 µm. Bahan bakar selanjutnya dilapisi oleh

lapisan penyangga dengan tebal 90 μm . Lapisan penyangga terbuat dari grafit berpori yang mempunyai fungsi untuk penyerapan unsur radioaktif hasil fisi yang lepas dari lapisan pertama. Selain itu lapisan penyangga ini dapat mengakomodasi pembengkakan bahan bakar kernel yang karena adanya pemuaian akibat kenaikan suhu sampai 1600 $^{\circ}\text{C}$. Lapisan selanjutnya adalah lapisan karbon pirolitik (PyC) dengan tebal 35 μm yang berfungsi sebagai lapisan bejana penerima tekanan dari lapisan sebelumnya. Lapisan silisium karbida (SiC) yang mempunyai fungsi sebagai penahan keselamatan unsur radioaktif hasil fisi yang lepas dari lapisan sebelumnya, lapisan ini mempunyai tebal 40 μm . Lapisan terluar adalah lapisan dibuat dari grafit pirolitik (PyC) yang mempunyai tebal 45 μm yang berfungsi sebagai pertahanan akhir dari bahan bakar [10-13]. Struktur lapisan triso ini pada kondisi normal mampu menahan radionuklida hasil fisi dan transurium tetap berada pada struktur bahan bakar.

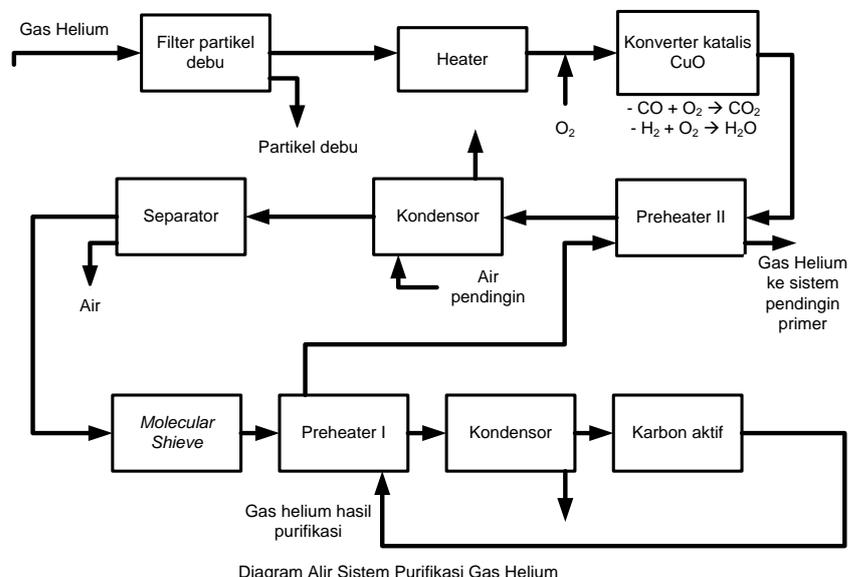
Bahan bakar RDE tipe HTR-10 berbentuk pebel (bentuk bola) dimana setiap elemen pebel yang berdiameter 6 cm berisi 8.335 partikel berlapis triso. Setiap elemen pebel mengandung 5 gram *heavy metal* (HM) yang merupakan campuran dari U-234, U-235, dan U-238. Partikel-partikel tersebut didalam pebel terimobilisasi dalam matriks grafit. Seperti yang terlihat pada Gambar 1 bahwa dalam reaktor, lapisan luar dari elemen pebel bersinggungan langsung dengan molekul gas helium, sehingga terdapat resiko adanya partikel debu yang lepas dari lapisan luar tersebut dan terdispersi kedalam gas helium. [3].

Sistem Purifikasi Gas Helium Pada Rde Tipe HTR-10

Sistem pendingin primer RDE tipe HTR-10 yang menggunakan gas helium sebagai media pendingin reaktor memiliki beberapa fungsi [2,9,14-16]:

- Penghilangan kontaminan kimia dan partikel debu grafit dari pendingin primer untuk mempertahankan nilai kemurnian gas helium sesuai dengan spesifikasinya.
- Penyediaan gas helium murni ke sistem yang membutuhkannya (teras reaktor dan pembangkit uap air).
- Pengosongan gas helium dari sistem primer dan sistem pendukung yang berisi gas helium dan ditampung dalam tangki penampung gas helium murni (kegiatan tersebut dilakukan pada saat kegiatan perawatan).
- Pengurangan tekanan dan penghilangan gas helium dari sistem pendukung dan penunjang yang berisi gas helium, dan memungkinkan menampung kontaminan radioaktif dalam gas helium.
- Evakuasi sistem primer dan sistem pendukung gas helium.

Sistem purifikasi gas helium pada operasi normal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3



Gambar 3. Diagram Sistem Purifikasi Gas Helium [2,9,14-16]

Pada sistem ini sebanyak 10,5 kg/j (5% laju alir gas helium) dimasukkan secara *bypass* kedalam sistem purifikasi dan selanjutnya gas helium hasil purifikasi dimasukkan kembali kedalam sistem pendingin primer. Gas helium tersebut pada awalnya melewati filter penghilang partikel debu, dan kemudian dilewatkan ke pemanas. Jika diperlukan, pemanas ini dapat menaikkan suhu gas helium sampai sekitar 250 °C, oleh karena itu sistem purifikasi akan tetap dapat dilakukan bahkan ketika sistem pendingin primer mendingin. Suhu 250 °C merupakan suhu operasi optimal *converter* katalitis CuO. Gas helium panas selanjutnya dilewatkan ke *converter* katalitis CuO untuk mengoksidasi HT menjadi HTO, CO menjadi CO₂ dan H₂ menjadi H₂O dengan penambahan gas O₂ (T adalah tritium yaitu H-3). Gas helium keluar dari *converter* yang masih bersuhu tinggi selanjutnya dilewatkan ke pemanas untuk pemanasan gas helium hasil purifikasi sebelum dimasukkan kembali ke sistem pendingin primer. Gas helium yang keluar dari pemanas kemudian dilewatkan ke pendingin, gas tersebut didinginkan sampai kandungan uap airnya mengembun, selanjutnya embunan uap air dipisahkan pada separator air. Gas helium yang keluar dari separator air mempunyai suhu sekitar 40 °C kemudian dilewatkan ke *molecular sieve* untuk pengambilan partikel yang berukuran kecil (HTO, H₂O dan CO₂). Gas helium yang keluar dari *molecular sieve* yang masih panas selanjutnya digunakan sebagai fluida pemanas pada pemanas untuk pemanasan gas helium hasil purifikasi. Gas tersebut selanjutnya dilewatkan ke kondensor yang berpendingin nitrogen cair untuk (pengembunan uap airnya) menurunkan suhu gas helium sampai sekitar suhu -180 °C (minus 180 °C). Gas fisi seperti Kr-85 dan Xe-133 dan juga gas-gas volatil seperti N₂, Ar dan CH₄ yang sulit diserap akan diserap dalam filter karbon aktif pada suhu sekitar -180 °C. Gas helium yang keluar dari filter merupakan gas helium hasil purifikasi dipanaskan dalam untuk selanjutnya dimasukkan dalam sistem pendingin primer atau disimpan dalam tangki helium murni..

METODOLOGI

Makalah ini berupa kajian yang disusun berdasarkan referensi yang meliputi dokumen teknis kajian pengelolaan limbah RDE tipe HTR-10, spesifikasi teknis dari vendor, dokumen terbitan *International Atomic Energy Agency* (IAEA), publikasi dari para Peneliti dan *Expert* asing, serta hasil diskusi dengan beberapa narasumber dalam berbagai Workshop. Makalah kajian sistem pemurnian helium pada reaktor

daya experimental (RDE) tipe HTR-10 ini dilakukan di PTLR-BATAN pada Tahun 2016.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Gas pendingin helium setelah keluar dari teras reaktor mengandung gas dan unsur radioaktif *volatile* seperti hasil fisi, gas tritium (³H₂) dan karbon-14, serta partikel debu grafit. Tritium merupakan hasil aktivasi neutron terhadap boron dan litium (dalam moderator grafit), helium-3 (dalam gas helium), dan pengotor gas helium (berupa CH₄, uap air dan hidrogen). Karbon-14 merupakan hasil aktivasi neutron dari pengotor gas helium (CO dan N₂). Didalam sirkulasinya, aktivitas, humiditas dan kadar partikel debu didalam gas helium semakin meningkat, oleh karena itu gas helium diolah dalam sistem purifikasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Melalui sistem purifikasi gas helium ini maka debu grafit, humiditas dan unsur-unsur radioaktifnya dapat dihilangkan [10,11,17,18].

Gas helium yang digunakan sebagai pendingin primer pada RDE harus memenuhi persyaratan kemurnian yang tinggi. Oleh karena itu sistem purifikasi gas helium menghilangkan kontaminan gas sehingga mencapai kemurnian yang tinggi dengan standar konsentrasi kontaminan seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Standar konsentrasi kontaminan dalam gas helium hasil purifikasi [2,9,14]

Jenis Kontaminan	Nilai Batas Konsentrasi (ppm)
H ₂ O	≤ 0,2
CO	≤ 3
N ₂	≤ 1
H ₂	≤ 5
CH ₄	≤ 1
O ₂	≤ 0,02
CO ₂	≤ 0,6

Tabel 1 menunjukkan batas konsentrasi kontaminan yang diijinkan dalam gas helium sebagai sistem pendingin primer. Konsentrasi kontaminan dalam gas helium yang melebihi nilai batas tersebut akan menyebabkan akibat

samping yaitu kelebihan kadar H₂O menimbulkan *water ingress* dan kelebihan konsentrasi N₂ dan O₂ menyebabkan *air ingress*. Peristiwa *water ingress* dan *air ingress* harus dihindari karena dapat menyebabkan kecelakaan berupa ledakan pada teras reaktor. Sedangkan kelebihan kadar N₂, CO, CH₄ dan CO₂ menimbulkan produk aktivasi C-14 pada konsentrasi yang tinggi.

Dalam RDE tipe HTR-10 memiliki 2 unit sistem purifikasi helium yang beroperasi sesuai dengan fungsinya yaitu 1 unit yang berfungsi pada operasi normal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3, sedangkan yang 1 unit lagi yang biasa disebut unit tambahan dioperasikan pada saat dilakukan regenerasi sistem purifikasi dan juga dioperasikan pada saat terjadi kegagalan sistem operasi. Seluruh sistem purifikasi helium dioperasikan sesuai dengan kriteria disain yang telah ditentukan. Unit pemurnian helium dari jalur tambahan secara umum mempunyai fungsi yang mirip seperti unit pemurnian helium utama yang dioperasikan pada kondisi normal. Unit pemurnian utama dan tambahan beroperasi secara bergantian.

Pada kondisi normal, sistem purifikasi dijalankan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Namun demikian jika terjadi kegagalan operasi seperti terjadinya kebocoran air ke dalam sistem utama telah terjadi, maka unit pemurnian tambahan dijalankan secara manual. Sistem utama kemudian diisolasi secara manual dan aliran helium diarahkan ke unit pemurnian helium tambahan. Pada kondisi ini aliran pemurnian helium dinaikkan hingga sekitar 245 kg/jam.

Sistem pemurnian helium tambahan juga beroperasi pada saat dilakukan regenerasi sistem. Jika Sistem pemurnian helium memerlukan regenerasi ketika CuO telah tereduksi menjadi Cu atau *molecellar sieve* atau adsorber karbon aktif akan diganti. Meningkatnya jumlah kontaminan tertentu pada aliran gas helium setelah melewati adsorber karbon aktif mengindikasikan bahwa sistem memerlukan regenerasi. Sebelum dilakukan regenerasi aliran pemurnian diubah kedalam aliran pemurnian tambahan dan tekanan dalam sistem yang akan diregenerasi dilepaskan. Regenerasi adsorber karbon aktif dilakukan dengan *backwashing* dengan pemanasan. Setiap regenerasi baik untuk *molecellar sieve* maupun adsorber karbon aktif memiliki sebuah siklus regenerasi yang terpisah dan juga sistem evakuasinya. Untuk meregenerasi konverter katalistis CuO, oksigen disuntikkan secara berkala ke dalam aliran pemurnian. Gas-gas bekas proses regenerasi dikumpulkan di dalam tangki penyimpanan helium yang terkontaminasi radioaktif dan dibuang melalui *exhaust* udara

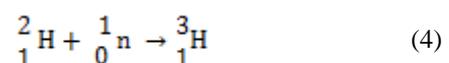
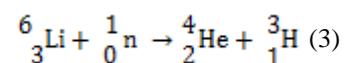
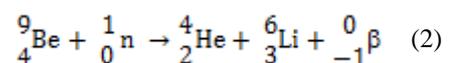
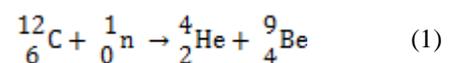
baik secepatnya atau setelah waktu penundaan (*delay*) yang cukup tergantung pada komposisi kontaminan tersebut. Semua limbah cair yang mengandung tritium yang dikumpulkan selama proses regenerasi dimasukkan ke dalam sistem ekstraksi air pada sistem pendukung helium.

Pada operasi RDE tipe HTR-10 tentunya akan ditimbulkan banyak hasil fisi. Diantara hasil fisi tersebut terdapat unsur radioaktif hasil fisi Cs-137 dan Sr-90 dapat berdifusi melewati struktur dan konstruksi triso bahan bakar kernel dan masuk kedalam pendingin primer helium. Selain itu unsur radioaktif hasil fisi yang berupa gas seperti gas Xe-133, I-131, Kr-85, Kr-87, Kr-88, dan H-3 dapat juga mendifusi melewati struktur dan konstruksi triso dan masuk kedalam pendingin gas helium.

Selain hasil fisi yang mengotori pendingin gas helium, terdapat unsur radioaktif yang harus diperhatikan yaitu tritium (H-3) karena tritium ini dapat menembus bahan-bahan logam dan masuk dalam sistem pendingin helium. Hal ini akan menyebabkan terbentuknya H₂. Tritium secara kimia seperti hidrogen, dapat terjadi reaksi pertukaran ion antara tritium dengan hidrogen sehingga di dalam pengotor helium seperti H₂O, H₂ atau CH₄ terdapat ion tritium. Tritium dapat berasal dari aktivasi neutron terhadap pengotor gas helium ataupun dari aktivasi neutron pada boron dan litium yang terdapat dalam moderator grafit. Dalam gas helium terdapat pengotor yang berupa He-3, H₂O, H₂ atau CH₄, N-14 dan C-13. Aktivasi neutron terhadap N-14 dan C-13 akan menghasilkan karbon-14 (C-14).

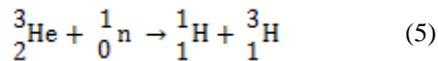
Berikut adalah beberapa reaksi pembentukan tritium dari beberapa bahan

- 1) Reaksi pembentukan tritium dari aktivasi neutron dari boron dan lithium dalam moderator grafit ditunjukkan pada persamaan reaksi 1,2,3 dan 4 sebagai berikut [2,6,9,19]:

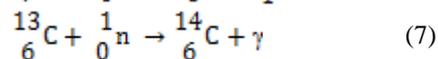
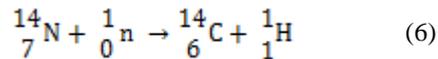


- 2). Reaksi pembentukan tritium dari aktivasi neutron terhadap He-3 yang terdapat dalam

pendingin helium ditunjukkan pada persamaan 5 sebagai berikut [2,6,9,19]:



- 3). Reaksi pembentukan karbon C-14 melalui aktivasi neutron terhadap pengotor N-14 dan C-13 dalam pendingin He adalah sebagai berikut [[2,6,9,19,20]:



Pengoperasian sistem purifikasi helium juga menimbulkan limbah radioaktif padat yang berupa debu grafit yang tertangkap pada *bag filter*, *prefilter*, filter karbon aktif bekas, padatan terkontaminasi dari kegiatan perawatan yang terdiri dari sarung tangan, kertas, kain dan pakaian, dan lainnya.. Selain limbah radioaktif padat, pada pengoperasian sistem purifikasi gas helium juga ditimbulkan limbah radioaktif cair yang mengandung H-3, C-14, Cs-137, Sr-90, pada tingkat aktivitas rendah dan sedang. Seluruh limbah yang ditimbulkan dari operasional sistem purifikasi gas helium harus dilakukan pengelolaan dengan baik agar masyarakat dan lingkungan dapat selamat dalam memanfaatkan teknologi nuklir saat ini maupun dimasa mendatang.

KESIMPULAN

Sistem purifikasi pendingin primer helium merupakan bagian yang penting dari operasional RDE tipe HTR-10. Gas helium dalam teras reaktor mengambil panas dari reaksi fisi untuk selanjutnya panas digunakan untuk pembangkitan uap. Terdapat 2 unit sitem purifikasi helium dalam operasional RDE tipe HTR-10. Sistem utama yang beroperasi pada kondisi normal dan sistem purifikasi tambahan yang beroperasi pada kondisi khusus yaitu pada saat terjadi kegagalan sistem dan pada saat regenerasi beberapa peralatan dalam unit purifikasi helium. Terdapat radionuklida hasil fisi yang menembus lapisan triso dan masuk kedalam gas helium seperti Cs-137 dan Sr-90. Selain itu juga terdapat gas Xe-133, I-131, Kr-85, Kr-87, Kr-88, dan H-3 dapat juga mendifusi melewati struktur dan konstruksi triso dan masuk kedalam pendingin gas helium. Oleh karena itu sistem purifikasi gas helium menghilangkan kontaminan tersebut sehingga mencapai kemurnian yang tinggi. Pada operasional unit purifikasi gas helium akan ditimbulkan limbah radioaktif baik cair maupun padat yang harus

dikelola dengan baik selamat bagi masyarakat dan lingkungan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada rekan rekan Bidang Teknologi Pengolahan dan Penyimpanan Limbah yang telah berpartisipasi dalam penyusunan dokumen teknis pengelolaan Limbah RDE sehingga dapat menjadi acuan dalam kegiatan terkait dengan limbah RDE.

DAFTAR PUSTAKA

- Keputusan Presiden No. 5 Tahun 2000 Tentang Kebijakan Energi Nasional
- Zainus Salimin, Endang Nuraini , Pengkajian Pengelolaan Limbah Radioaktif Reaktor Daya Eksperimental Tipe HTR-10, Prosiding Seminar Nasional Teknologi Pengelolaan Limbah XIII, PTLR, (2015) 1-14
- Andrew C. Kadak, Ph.D, High Temperature Gas Reactors, Kadak Associates, Inc, 2010, <http://web.mit.edu/pebble-bed/Presentation/HTGR.pdf>
- Rencana Pembangunan Jangka Menengah BATAN 2015-2019, BATAN, 2014
- Hyedong Jeong and Soon Heung Chang, "Estimation of the Fission Products, Actinides and Tritium of HTR-10", International Journal of Nuclear Engineering and Technology Vol 4 No 5. June 2009, 729-738, 2009.
- Zongxin Wu, Dengcai Lin, Daxin Zhong, "The Design Features of The HTR-10", Nuclear Engineering and Design 218, Elsevier, 2002.
- BATAN-RENUKO, "Conceptual Design for General Design features of the RDE" RDE-DS-WBS02-01, Jakarta, September 2015.
- BATAN-RENUKO, "Nuclear Steam Supply Sistem", RDE-DS-WBS02-201-002-001, Jakarta, September 2015. (gambar)
- PTLR, Kajian Pengelolaan Limbah Radioaktif Reaktor Daya Eksperimental (RDE) tipe HTR-10, Dokumen Teknis (2015)
- Sihana, "Pengelolaan Limbah Pebel Suhu Tinggi", Materi Workshop Pengelolaan Limbah HTR-10, PTLR-BATAN, Serpong, 7 Oktober 2014.

11. Mohammad Dhandhang Purwadi, "Teknologi Reaktor Gas Temperatur Tinggi dan Limbahnya", Materi Workshop Pengelolaan Limbah HTR-10, PTLR-BATAN, Serpong, 18 September 2014.
12. Irson J, "Important Viewpoints Proposed for a Safety Approach of HTGR Reactions in Europe", International Proceeding ICENES, Belgia, 2005.
13. Wu Z and Yu S, "HTGR Projects in China", International Journal on Nuclear Engineering and Technology, vol 39. No 2, 103-110, 2007.
14. BATAN-RENUKO, "Conceptual Design for Helium Purification Sistem/Helium Supporting Sistem ", RDE-DS-WBS02-201-003, Jakarta, September 2015.
15. BATAN-RENUKO, "Helium Purification Scematic Diagram", RDE-DS-WBS02-201-003-002, Jakarta, September 2015.
16. BATAN-RENUKO, "Helium Supply and Storage Sistem KBB Scematic Diagram", RDE-DS-WBS02-201-003-003, Jakarta, September 2015.
17. Kurt Kugeler, "Waste Management : Spent HTR-Fuel Elements", Institute for Safety Research and Reactor Technology (ISR), Research Center Jülich, 2001.
18. K. J. Nortz, "An Overview of HTGR Fuel Recycle", Oak Ridge National Laboratory, Chemical Technology Division, USA, 1976.
19. Westing House Electric Company, Radioactive Waste management AP 1000 Design Control Management, Revision 17, Westing House pittsburgh, 2010
20. Manson benedict, " Nuclear Chemical Engineering Second Edition", Mc Graw Hill Book Company, New York, 1981.

PENGOLAHAN LIMBAH DAUN JATI KERING DARI DESA LEYANGAN, UNGARAN MENJADI PULP KERING DENGAN PROSES SODA

Linda Kusumaningrum¹, Heny Kusumayanti²

^{1,2}Teknik Kimia, Universitas Diponegoro

Jalan Prof. Soedarto, Tembalang, Semarang

Email: linda_akatsuki@yahoo.com, henykusuma_yanti@yahoo.co.id

ABSTRAK

PENGOLAHAN LIMBAH DAUN JATI KERING DARI DESA LEYANGAN, UNGARAN MENJADI PULP KERING DENGAN PROSES SODA Pencarian bahan baku alternatif sangat dibutuhkan untuk mengurangi ketergantungan pada pulp kayu, sehingga dapat dijadikan bahan baku alternatif pembuatan bubur kertas. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh konsentrasi NaOH dan waktu terhadap besarnya kadar air dan kadar selulosa pulp dari limbah daun jati kering. Limbah daun jati kering diperoleh di desa Leyangan, Ungaran. Dengan adanya pengolahan limbah daun jati kering ini dapat mengurangi pencemaran lingkungan, selain itu limbah daun jati kering dapat mempunyai nilai lebih dengan diolah menjadi pulp. Proses pembuatan pulp yang digunakan dalam penelitian ini adalah proses soda yaitu melepaskan serat daun jati kering dengan larutan natrium hidroksida. Untuk mengetahui perbedaan warna dari pulp daun jati kering, maka perlu dilakukan proses pemutihan (bleaching). Salah satu bahan pemutih yang dapat digunakan adalah kaporit ($\text{Ca}(\text{ClO})_2$). Penelitian ini untuk mengetahui pengaruh waktu pemasakan, suhu pemasakan dan zat pemutih terhadap % yield dan % kadar selulosa pulp yang dihasilkan. Jangkauan variabel yang digunakan pada penelitian ini adalah waktu pemasakan 80 dan 90 menit dengan konsentrasi NaOH 20% serta suhu pemasakan 90°C dan 110°C. Hasil kualitas pulp yang dihasilkan kemudian dianalisa untuk mendapatkan % kadar selulosa dan % yield. Diperoleh hasil pulp terbaik pada waktu pemasakan 80 menit, dengan konsentrasi NaOH 20%.

Kata Kunci : limbah daun jati kering, proses soda, pulp, waktu pemasakan.

ABSTRACT

WASTE TREATMENT WITH DRIED TEAK LEAVES TO PULP FROM LEYANGAN, UNGARAN USING SODIUM HYDROXIDE PROCESS Search of alternative materials are needed to reduce raw material on wood pulp only. Waste dried teak leaves contain cellulose which is quite high, so it can be made of alternative materials in the manufacture of paper pulp. This study aims to determine the effect of NaOH concentration and time on the degree of water and cellulose of the teak leaves. Waste dried teak leaves obtained in the village Leyangan, Ungaran. The sewage treatment waste dried teak leaves it can reduce pollution, besides that, can has value over with mixed to pulp. Process pulping used in this study is the process of soda that hydrolyzes dried teak leaf fibers with a solution of sodium hydroxide. To increase the commercial value of the teak leaves pulp, it is necessary to bleaching. One of the bleach can be used is ($\text{Ca}(\text{ClO})_2$). The study looked at the effect of pulping time, temperature, the concentration of solvents and bleaching agents on the % yield and % of ISO brightness of paper produced. Range of variables used in this study is the cooking time 80 and 90 minutes with concentrations of 20% NaOH; and temperature with values 90°C and 110°C The results were analyzed to obtain quality paper % cellulose and % yield. The best pulp result was obtained at cooking time 80 minutes, concentration of NaOH 20%.

Keywords: waste dried teak leaves, sodium hydroxide process, pulp, time of pulping

PENDAHULUAN

Hampir sebagian besar bahan baku pembuatan pulp berasal dari kayu-kayu yang diperoleh di hutan alam. Dengan terus bertambahnya kapasitas industri pulp dan kertas, maka persediaan kayu-kayu hutan alam akan menipis. Usaha reboisasi atau penanaman kembali hutan gundul saja tidak cukup untuk memenuhi kekurangan bahan baku kayu bagi industri pulp dan kertas. Oleh karena itu, diperlukan suatu upaya penemuan bahan baku alternatif terutama yang murah, tidak merusak lingkungan, dan mudah diperoleh. Salah satu sumber serat yang sangat potensial adalah limbah daun jati kering.

Limbah daun jati kering sebagai bahan baku pembuatan pulp ini mudah diperoleh terutama di negara Indonesia yang beriklim tropis. Selain mudah diperoleh, limbah daun jati kering ini dapat mengurangi pencemaran lingkungan dan menambah nilai guna dari limbah daun jati kering.

Penelitian ini menggunakan proses soda dalam pembuatan pulp dari limbah daun jati kering. Proses soda dipilih karena merupakan proses yang umum dilakukan pada pembuatan pulp berbahan baku non-kayu. Proses pembuatan pulp dari limbah daun jati kering ini, sebelumnya perlu diketahui kondisi optimum operasi pembuatannya dengan

menggunakan alat digester untuk dihasilkan pulp kering.

Tanaman jati yang tumbuh di Indonesia berasal dari India. Tanaman yang mempunyai nama ilmiah *Tectona grandis* linn. F. Secara historis, nama *Tectona* berasal dari bahasa Portugis (tekton) yang berarti tumbuhan yang memiliki kualitas tinggi. Di Negara asalnya, tanaman jati ini dikenal dengan banyak nama daerah, seperti *ching-jagu* (di wilayah Asam), *saigun* (Bengali), *tekku* (Bombay), dan *kyun* (Burma). Tanaman ini dalam bahasa Jerman dikenal dengan nama *teck* atau *teakbun*, sedangkan di Inggris dikenal dengan nama *teak* (Sumarna, 2004).

Pada proses soda menggunakan penambahan NaOH yang berfungsi sebagai larutan pemasak dimana sistem pemasaknya dilakukan dengan tekanan yang tinggi. Perbandingan larutan pemasaknya yaitu 4 : 1 dari kayu yang akan digunakan. Proses alkali atau proses soda ini sulit untuk memperoleh zat kimia dari larutan pemasak sehingga jarang sekali untuk digunakan dibandingkan dengan proses sulfit. Keuntungan proses soda adalah bahan baku yang dipakai dapat bermacam-macam (Surest *et al.*, 2010).

TINJAUAN PUSTAKA

Daun Jati

Tanaman jati yang tumbuh di Indonesia berasal dari India. Tanaman yang mempunyai nama ilmiah *Tectona grandis* linn. F. Secara historis, nama *Tectona* berasal dari bahasa Portugis (tekton) yang berarti tumbuhan yang memiliki kualitas tinggi. Di Negara asalnya, tanaman jati ini dikenal dengan banyak nama daerah, seperti *ching-jagu* (di wilayah Asam), *saigun* (Bengali), *tekku* (Bombay), dan *kyun* (Burma). Tanaman ini dalam bahasa Jerman dikenal dengan nama *teck* atau *teakbun*, sedangkan di Inggris dikenal dengan nama *teak* (Sumarna, 2004).

Proses Pembuatan Pulp

Pemisahan serat selulosa dari bahan-bahan bukan serat kayu dan bukan kayu dapat dilakukan dengan berbagai proses, yaitu proses mekanik, proses semi-kimia dan proses kimia.

1. Proses Mekanik

Pada proses mekanik kayu gelondongan dihancurkan dengan gilingan batu sambil menyemprotkan air ke permukaan gilingan batu untuk mengeluarkan bahan yang sudah digiling. Metode ini hanya digunakan untuk jenis kayu lunak yaitu jenis kayu yang berasal dari pohon berdaun jarum dan kelebihan proses ini adalah dapat mengubah 95% berat kering kayu menjadi pulp, sedangkan kekurangan pada proses ini yaitu

akan membutuhkan jumlah energi yang sangat besar untuk mengerjakannya sehingga kurang efisien (Gunawan *et al.*, 2012).

2. Proses Kimia

Pada metode ini serpihan kayu dimasukkan ke dalam bahan kimia untuk mengeluarkan lignin dan karbohidrat. Ada 3 proses kimia yang digunakan yaitu :

a. Proses Soda

Pada proses soda menggunakan penambahan NaOH yang berfungsi sebagai larutan pemasak dimana sistem pemasaknya dilakukan dengan tekanan yang tinggi. Perbandingan larutan pemasaknya yaitu 4 : 1 dari kayu yang digunakan. Proses alkali atau proses soda ini sulit untuk memperoleh zat kimia dari larutan pemasak sehingga jarang untuk digunakan dibandingkan dengan proses sulfit. Keuntungan proses soda adalah bahan baku yang dipakai dapat bermacam-macam.

b. Proses Kraft

Proses kraft atau yang biasa disebut proses sulfat ini menggunakan bahan natrium hidroksida yang ditambahkan natrium sulfat. Pada proses kraft ini terjadi pembentukan natrium sulfida yaitu hasil dari reduksi natrium sulfat yang ditambahkan ke dalam tungku. Kelebihan proses kraft ini adalah hasil sifat-sifat pulpnya jauh lebih baik dari proses lainnya dan dapat digunakan untuk berbagai jenis kayu sehingga proses ini sering sekali digunakan dalam proses pembuatan *pulp*. Kelemahan dari proses ini adalah bau gas (SO_2 dan Cl_2) yang tidak enak dan kebutuhan bahan kimia pemutih yang tinggi untuk pulp kraft dari kayu lunak yang sukar untuk diatasi.

c. Proses sulfit

Campuran asam sulfur (H_2SO_3) dan ion bisulfat (HSO_3^-) adalah bahan kimia yang digunakan dalam proses sulfit dimana bahan tersebut ditambahkan untuk melarutkan lignin. Asam sulfit menunjukkan bahwa pembuatan *pulp* dibuat dengan kelebihan asam sulfur (pH 1-2), sedangkan pemasakan bisulfat dibuat di bawah kondisi yang kurang asam (pH 3-5). Kelebihan dari proses sulfit adalah *pulp* yang dihasilkan lebih cerah dan mudah untuk diputihkan, sedangkan kekurangannya adalah hasil lembaran kertasnya lebih lemah dibandingkan pulp sulfat (kraft) (Surest *et al.*, 2010).

3. Organosolv

Proses *organosolv* menggunakan bahan kimia organik seperti metanol, etanol, aseton, asam asetat, dan lain-lain untuk memisahkan serat-serat pada kayu. Proses ini memiliki kelebihan yaitu telah terbukti memberikan dampak yang baik bagi lingkungan, rendemen pulp yang dihasilkan tinggi, tidak menggunakan unsur sulfur sehingga lebih aman dan memiliki hasil sampingan berupa lignin dan hemiselulosa dengan tingkat kemurnian tinggi. Proses ini sangat efisien karena dapat mengurangi pemanfaatan sumberdaya hutan. Organosolv memiliki banyak macam jenis proses, tetapi yang sampai saat ini telah berkembang pesat adalah proses *alcell* (*alcohol cellulose*) yaitu proses *pulping* yang menggunakan bahan kimia pemasak berupa alkohol dan proses *acetosolv* dengan menggunakan bahan kimia pemasak berupa asam asetat (Gunawan *et al.*, 2012).

Proses Soda

Pada proses soda menggunakan penambahan NaOH yang berfungsi sebagai larutan pemasak dimana sistem pemasakannya dilakukan dengan tekanan yang tinggi. Perbandingan larutan pemasaknya yaitu 4 : 1 dari kayu yang akan digunakan. Proses alkali atau proses soda ini sulit untuk memperoleh zat kimia dari larutan pemasak sehingga jarang sekali untuk digunakan dibandingkan dengan proses sulfit. Keuntungan proses soda adalah bahan baku yang dipakai dapat bermacam-macam (Surest *et al.*, 2010).

NaOH

Natrium Hidroksida (NaOH) terbentuk dari oksida basa. Natrium Oksida yang dilarutkan dalam air. Natrium hidroksida membentuk larutan alkalin yang kuat ketika dilarutkan ke dalam air. Natrium Hidroksida berbentuk kristal berwarna putih dan sangat korosif terhadap kulit. Dalam dunia industri NaOH disebut dengan istilah soda kaustik. Reaksi yang terjadi apabila NaOH dilarutkan dalam air akan menimbulkan reaksi eksotermis (Surest *et al.*, 2010).

Sifat Kimia NaOH

- Berwarna putih atau praktis putih
- Berbentuk pellet, serpihan atau batang atau bentuk lain

- Sangat basa dan mudah terionisasi membentuk ion natrium dan hidroksida
- Keras, rapuh dan menunjukkan pecahan hablur
- Bila dibiarkan di udara akan cepat menyerap karbondioksida dan lembab
- Mudah larut dalam air dan dalam etanol tetapi tidak larut dalam eter
- NaOH membentuk basa kuat bila dilarutkan dalam air

Tabel 1. Sifat Fisika NaOH

NaOH	Nilai
Berat Molekul	40gr/mol
Specific Gravity	2,130gr/cm ³
Titik Leleh	318,4°C
Titik Didih	1390°C

(Perry, 1997)

METODOLOGI

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Proses Industri Kimia PSD III Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Diponegoro.

Alat yang Digunakan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini antara lain pengaduk, sendok, pipet, kaca arloji, cawan porselen, gelas ukur, beaker glass, labu takar, neraca digital, digester, muffle furnace, oven, desikator.

Bahan yang Digunakan

Bahan pembuatan pulp yang digunakan yaitu limbah daun jati kering dan NaOH. Daun jati kering didapatkan dari daerah Leyangan, Ungaran. Sedangkan NaOH dibeli di Toko Indrasari, Semarang. Bahan – bahan yang digunakan untuk analisa yaitu NaOH, Kaporit (Ca(ClO)₂), Aquadest dan Asam Asetat (CH₃COOH) yang dibeli di Toko Indrasari, Semarang.

Variabel Percobaan

Variabel Tetap

- Sampah daun jati kering (berat sampel) : 350 gram
- NaOH : 20% sebanyak 5000 mL

Variabel Bebas

- Temperatur Pemasakan: 100±10°C
- Waktu Pemasakan : 80 dan 90 menit

• **Penelitian**

Dalam penelitian, proses pulping yang digunakan adalah proses soda, dengan perhitungan :

- a. Bahan baku fleksibel dan mudah didapat di Indonesia
- b. Pemanfaatan hasil pertanian sehingga mengurangi limbah daun jati kering

Metode Pendekatan

Percobaan yang akan dilakukan meliputi 3 tahap, yaitu :analisa terhadap bahan dasar, pemasakan dengan proses soda, proses pemutihan (*bleaching*).

Analisa bahan dasar daun jati kering, akan dilakukan beberapa macam analisa yaitu :

menentukan kadar air, menentukan kadar abu, menentukan kadar selulosa.

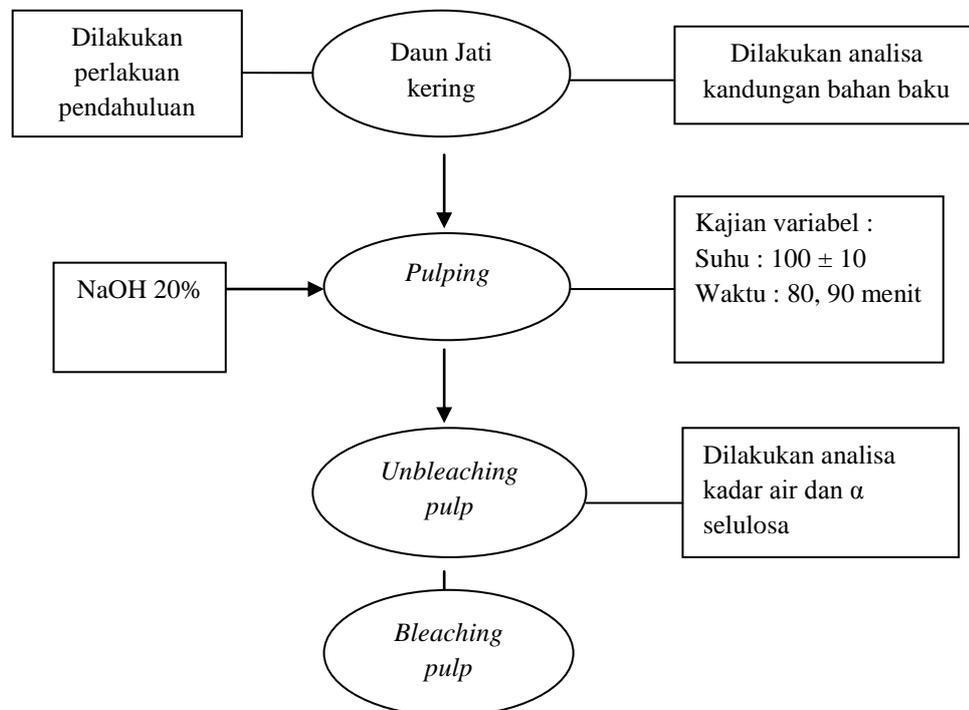
Selanjutnya pada analisa hasil pulp pemasakan akan dilakukan beberapa macam analisa, yaitu: menentukan kadar yield, menentukan kadar α selulosa.

Tabel 2. Percobaan Proses *Bleaching*

Analisa	Hasil
Kadar α selulosa	%
Hasil warna sebelum <i>bleaching</i>	Warna
Hasil warna setelah <i>bleaching</i>	Warna

Tabel 3. Hasil Percobaan *pulping* dengan proses soda

Variabel	Variabel Berubah		Kadar Abu	Kadar α selulosa	Kadar Air
	T ($^{\circ}$ C)	t (menit)			
I	90	80	a ₁	b ₁	c ₁
II	110	90	a ₂	b ₂	c ₂



Gambar 1. Proses Pembuatan Pulp

Prosedur Kerja

• Analisa Bahan Baku

a. Menentukan Kadar Air

Langkah – langkahnya :

- 1) Menimbang 4 gram sampel dalam cawan porselen
- 2) Mengeringkan sampel dalam oven pada suhu 100°C selama 1 jam lalu didinginkan dalam desikator kemudian ditimbang. Hal ini kita ulangi hingga memperoleh penimbangan dengan berat konstan
- 3) Menghitung kadar air
$$\% \text{ Kadar air} = \frac{a-b}{2} \times 100\% \quad \dots (1)$$

Keterangan :

a = Berat cawan porselen

b = Berat cawan porselen setelah di oven

b. Menentukan Kadar Abu

Langkah – langkahnya :

- 1) Membakar krus kosong dalam *muffle furnace* (oven yang suhunya lebih tinggi) pada suhu 100°C hingga memperoleh berat konstan. Misal a gram. Menimbang 4 gram sampel, masukkan dalam krus porselen tadi, kemudian pindahkan dalam *muffle furnace* dan dibakar pada suhu 600°C selama 2 s/d 4 jam hingga seluruh karbon terbakar.
- 2) Mendinginkan sampel dalam desikator
- 3) Mengulangi percobaan hingga diperoleh berat konstan
- 4) Menghitung kadar abu :

$$\frac{b-a}{\text{berat sampel bebas air}} \times 100\% \dots (2)$$

Keterangan :

a = Berat krus porselen setelah dibakar dalam *muffle furnace*

b = Berat bahan dan berat krus porselen setelah dibakar di *furnace*

c. Menentukan Kadar α Sellulosa

Langkah – langkahnya :

- 1) Menimbang 4 gram sampel kering dalam beaker glass, letakkan dalam *cooler bath* dan suhu dijaga 20°C .
- 2) Menambahkan 35 mL NaOH 17,5% diaduk selama 5 menit lalu tambahkan lagi 10 mL dan aduk selama 10 menit. Tambahkan lagi masing-masing 10 mL pada menit ke 2,5;5;10 menit berikutnya.
- 3) Menutup beaker glass dengan kaca arloji dan biarkan selama 3 menit.
- 4) Menambahkan aquadest 100 mL aduk hingga homogen dan biarkan selama 30 menit.
- 5) Menyaring dengan saringan penghisap dan sisa sampel dalam beaker glass dikeluarkan dengan bantuan penambahan 25 mL NaOH 8,5%.

- 6) Mencuci endapan dengan aquadest 5×50 mL.
- 7) Menyaring dengan saringan penghisap dan lanjutkan pencucian dengan aquadest ± 400 mL.
- 8) Menambahkan 40 mL asam asetat 2 N.
- 9) Biarkan endapan terendam dahulu baru cairan dibuang kemudian mencuci sampel dengan aquadest hingga larutan menjadi netral. Setiap kali pencucian diuji.
- 10) Setelah netral, mengeringkan sampel dalam oven pada suhu $105^{\circ}\text{C} \pm 30^{\circ}\text{C}$.
- 11) Mendinginkan sampel dalam desikator dan timbang, mengulangi hal tersebut hingga diperoleh berat konstan, misal b gram.
- 12) Menghitung kadar α selulosa :

$$\frac{b}{3} \times 100\% \quad \dots (3)$$

Keterangan :

b = berat beaker glass dan berat sampel yang telah kering di oven

Pemasakan (*Pulping*) dengan Proses Soda

- 1) Memotong daun jati kering yang sudah disiapkan dengan menggunakan pisau atau gunting kemudian dikeringkan
- 2) Menimbang daun jati kering sebanyak 350 gram kemudian masukkan dalam digester dan tambahkan larutan pemasak NaOH 20%
- 3) Memasak selama 60 ± 10 menit dengan suhu $90 \pm 10^{\circ}\text{C}$
- 4) Menyaring pulp hingga diperoleh pulp dan cairan black liquor dimana cairan ini dibuang dan pulp dianalisa

Analisa Pulp Hasil Pemasakan

1. Menentukan kadar yield
2. Menentukan kadar α sellulosa

Penjelasan :

a) Menentukan Kadar Yield

- 1) Menimbang bahan baku yang akan dimasak sebagai bahan baku pembuat pulp
- 2) Setelah dimasak dengan variabel suhu dan waktu yang ditentukan ambil pulp yang dihasilkan untuk ditimbang, kemudian hitung % yield dengan cara :

% yield =

$$\frac{\text{jumlah pulp yang dihasilkan}}{\text{jumlah bahan baku}} \times 100\% \dots (4)$$

b) Menentukan Kadar α sellulosa

Langkah – langkahnya :

- 1) Menimbang 4 gram sampel kering dalam beaker glass, letakkan dalam water bath dan suhu dijaga $\pm 25^{\circ}\text{C}$

- 2) Menambahkan 35 mL larutan NaOH 17,5 % diaduk selama 5 menit lalu tambahkan lagi 10 mL dan aduk selama 10 menit. Tambahkan lagi masing – masing 10 mL pada menit ke 2,5 ; 5 ; 10 berikutnya
- 3) Menutup beaker glass dengan kaca arloji dan biarkan selama 3 menit
- 4) Menambahkan aquadest 100 mL aduk hingga homogen dan biarkan selama 3 menit
- 5) Menyaring dengan saringan penghisap dan sisa sampel dalam beaker glass, keluarkan dengan bantuan penambahan 25 mL NaOH 8,5%.
- 6) Mencuci endapan dengan aquadest 5 x 50 mL.
- 7) Menyaring dengan saringan penghisap dan lanjutkan pencucian dengan aquadest ± 400 mL.
- 8) Menambahkan 40 mL asam asetat 2 N.
- 9) Biarkan endapan direndam dahulu baru cairan dibuang kemudian dicuci dengan aquadest hingga netral.
- 10)Meringinkan dalam oven pada suhu $105^{\circ}\text{C} \pm 30^{\circ}\text{C}$.

- 11)Mendinginkan dalam desikator dan menimbang hingga berat konstan (misal b gram)

$$\text{Kadar } \alpha \text{ Sellulose} = \frac{b}{a} \times 100\% \quad \dots(5)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian pulping dan bleaching menggunakan bahan baku limbah daun jati kering dengan proses soda menggunakan digester, dimana variabel waktu pemasakan yang digunakan yaitu : 80 menit, 90 menit dan temperatur sebesar 90°C dan 110°C serta konsentrasi NaOH sebesar 20%.

Tabel 5. Hasil analisa bahan baku

Analisa	Persentase (%)
Kadar air	12,75 %
Kadar abu	10,76 %
Kadar α selulosa	48,60 %

Tabel 6. Hasil pulping dengan proses soda

Percobaan	Variabel berubah		Kadar Air (%)	Kadar α selulosa (%)
	Suhu ($^{\circ}\text{C}$)	Waktu (menit)		
I	90	80	13,25 %	89,78 %
II	110	90	15,75 %	87,20 %

Pulp yang di *bleaching* adalah pulp dengan kondisi operasi: suhu (T) : 90°C , waktu (t) : 80 menit, karena

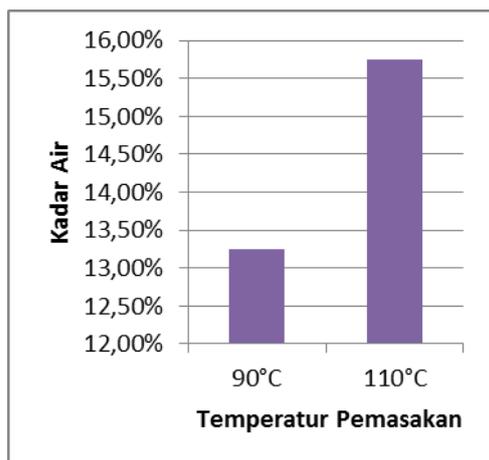
menghasilkan α -selulosa paling tinggi dan kadar air paling kecil.

Tabel 7. Hasil analisa pulping dan bleaching

Analisa	Hasil
Hasil warna sebelum bleaching	Hitam Kecoklatan
Hasil warna setelah bleaching	Putih Kekuningan

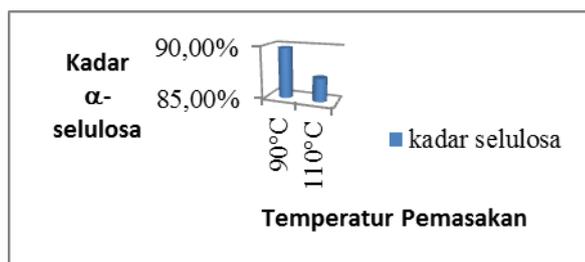
Pada penelitian ini dilakukan perlakuan awal yaitu menganalisa bahan baku berupa daun jati kering. Bahan baku berupa daun jati kering diperoleh dari kebun jati di daerah Leyangan, Ungaran. Analisa meliputi analisa kadar air, kadar abu dan kadar α selulosa. Nilai kadar air yang didapatkan sebesar 12,75 % , kadar abu

sebesar 10,76 % dan kadar α selulosa sebesar 48,60% , dari hasil analisa tersebut dengan kadar selulosa yang cukup tinggi maka bahan baku daun jati kering yang akan digunakan dapat diolah menjadi pulp yang cukup baik. Grafik hubungan antara temperatur pemasakan dan kadar air dapat dilihat pada Gambar 2



Gambar 2. Grafik hubungan antara temperatur pemasakan dengan kadar air

Berikut hasil analisa pulp: Variabel I dengan suhu yang digunakan sebesar 90°C dan waktu operasi selama 80 menit didapatkan analisa kadar air sebesar 13,25%, Variabel II dengan suhu 110°C dan waktu operasi selama 90 menit didapatkan analisa kadar air sebesar 15,75%.



Gambar 3. Grafik hubungan antara temperatur pemasakan dengan kadar α-selulosa

Berikut hasil analisa pulp: Variabel I dengan suhu yang digunakan sebesar 90°C dan waktu operasi selama 80 menit didapatkan analisa kadar α-selulosa sebesar 89,78% , Variabel II dengan suhu 110°C dan waktu operasi selama 90 menit didapatkan analisa kadar α-selulosa sebesar 87,20%.

Hasil pulp yang telah dilakukan uji analisa didapatkan pulp terbaik dengan kondisi operasi 90°C dan waktu 80 menit dapat dilihat pada Gambar 4.

Kemudian pulp yang dihasilkan dilakukan proses bleaching dengan penambahan kaporit ($\text{Ca}(\text{ClO})_2$). Proses bleaching bertujuan untuk mengetahui perbedaan pulp dari segi warna dan kadar α – selulosa. Dengan tujuan agar mengetahui keefektifan zat pemutih (Kaporit) dalam bleaching. Dari proses bleaching, didapatkan hasil dengan perubahan warna dari hitam kecoklatan menjadi putih kekuningan.



Gambar 4. Pulp terbaik pada kondisi operasi 90°C dan waktu 80 menit

KESIMPULAN

1. Bahan baku yang digunakan pada penelitian ini adalah limbah daun jati kering yang merupakan bahan baku alternatif yang dapat digunakan dalam pembuatan kertas karena memiliki kadar α selulosa yang cukup tinggi.
2. Proses pulping yang digunakan adalah proses soda, dengan pertimbangan sebagai berikut: bahan baku yang dipakai dapat bermacam – macam, bahan baku berupa daun jati kering yang mudah didapatkan, mengurangi pencemaran lingkungan akibat limbah daun jati kering.
3. Berdasarkan penelitian yang dilakukan dapat disimpulkan bahwa pembuatan pulp yang paling baik terdapat pada percobaan I, yaitu pada kondisi operasi dengan suhu 90°C dan waktu pemasakan 80 menit didapatkan kadar air sebesar 13,25% dan kadar α-selulosa sebesar 89,78%.
4. Pada proses pemutihan (*bleaching*), dilakukan dengan perendaman dalam larutan kaporit ($\text{Ca}(\text{ClO})_2$) dan menghasilkan warna putih kekuningan (lebih putih dari warna pulp sebelum *bleaching*).

UCAPAN TERIMAKASIH

- PSD III Teknik Kimia yang telah memberikan izin untuk melaksanakan penelitian di laboratorium
- Allah SWT, Orang tua, Kakak dan Adik, Teman-teman tercinta, Warga Leyangan, Ungaran

DAFTAR PUSTAKA

1. Gunawan, A., D. E. Sihotang dan M. Y. Thoha. 2012. Pengaruh Waktu Pemasakan dan Volume Larutan Pemasak Terhadap Viskositas Pulp dari Ampas Tebu. **Jurnal Teknik Kimia**, XVIII(2).
2. Surest, A.H. dan D. Satriawan. 2010. Pembuatan Pulp dari Batang Rosella dengan Proses Soda. **Jurnal Teknik Kimia**, XVII(3).
3. Wibisono, I., H. Leonardo, Antaresti dan Ayliaawati. 2011. Pembuatan Pulp dari Alang-alang. **Widya Teknik**, X(1): 11-20.
4. Perry, R. H. 1997. Perry's Chemical Engineers' Handbook. University of Kansas.

PEMBUATAN ZAT WARNA ALAMI DARI BUAH MANGROVE *SPESIES RHIZOPHORA STYLOSA* SEBAGAI PEWARNA BATIK RAMAH LINGKUNGAN DALAM SKALA PILOT PLAN

Paryanto¹⁾, Wusana Agung Wibowo¹⁾, Moch Helmy Aditya¹⁾

Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret

Jl. Ir. Sutami No. 36 A, Surakarta 57126 Telp/fax: 0271-632112

*Email : paryanto.uns@gmail.com

ABSTRAK

Berdasarkan sumbernya, zat warna tekstil dapat dibagi menjadi dua macam yaitu zat warna alami dan zat warna sintesis. Zat warna alam diperoleh dari hewan atau tumbuhan, berasal dari akar, batang, daun, buah, dan bunga. Sedangkan zat warna sintesis adalah zat warna buatan yang dibuat dengan proses reaksi kimia. Pembuatan zat warna alami dari buah mangrove jenis *Rhizophora stylosa* dilakukan ekstraksi secara batch dalam skala pilot plan. Kondisi operasi dari percobaan adalah 1 kg buah mangrove di ekstrak dengan pelarut air 10 L pada suhu 100 °C selama 60 menit. Hasil yang diperoleh dari proses tersebut adalah 6 L zat warna dalam konsentrasi tinggi, kemudian dilakukan pencelupan kain ke dalam zat warna dengan waktu perendaman selama 2 jam, 4 jam, 6 jam. Setelah itu dilakukan fiksasi pada kain batik. Fiksator yang digunakan adalah tawas (mengubah warna pada kain batik menjadi lebih cerah), kapur (mengubah warna pada kain batik menjadi lebih tua), dan tunjung (mengubah warna pada batik menjadi lebih gelap). Kain mori primisima yang telah di fiksasi dilakukan pengujian kelunturan terhadap cucian dengan *laundrometer* dan terhadap gosokan dengan *crockmeter*. Hasil pengujian dianalisa dengan *staining scale* (skala penodaan) dan *gray scale* (skala abu-abu). Pengujian dengan skala penodaan dibagi menjadi 2 yaitu dengan gosokan basah dan gosokan kering, diperoleh hasil terbaik dengan menggunakan fiksator tawas pada perendaman 2 jam, sedangkan pada uji terhadap cucian dengan skala abu-abu diperoleh hasil terbaik dengan fiksator kapur pada waktu 2 jam.

Kata Kunci : Ekstrak, warna alam, mangrove, fiksasi

ABSTRACT

Based on the source, the dye textiles can be divided into two kinds of natural dyes and synthetic colors. Currently mangrove fruit not been widely used, but the fruit of mangrove (*Rhizophora stylosa*) many contain tannins which are natural coloring pigments in the form of brown dye. Brown dyes used to dye batik. Manufacture of natural dyes from fruits mangrove *Rhizophora stylosa* batch extraction performed in a pilot scale plan. Operating conditions of the experiment was 1 kg of fruit mangrove solvent extract with 10 L of water at a temperature of 100 °C for 60 minutes. The results obtained from this process is 6 L dye in high concentrations, immersion kai later made into a dye immersion time for 2 hours, 4 hours, 6 hours. After the fixation on batik cloth using fiksator alum, lime and lotus. The test results were analyzed by *staining scale* (scale desecration) and *gray scale* (gray scale). Tests with scale desecration 2 is divided into the wet rub and dry rub, obtained the best results by using alum fixer on a 2-hour immersion, while in the laundry test with gray scale fixer obtained the best results with chalk on a time of 2 hours.

Keywords: Ekstrak, Natural dye, Mangrove, Fiksator

PENDAHULUAN

Mangrove merupakan salah satu bahan yang dapat dijadikan sebagai zat warna alami dalam pembatikan karena mangrove mengandung tanin. Tanin adalah pigmen tumbuhan dengan berat molekul tinggi antara 500-20.000 (Schofield, 2001). Tanin adalah suatu senyawa polifenol yang berasal dari tumbuhan, berasa pahit dan kelat, yang dapat menggumpalkan protein. Tanin pada bakau/mangrove sebagian besar terdiri dari 4 flavonoid monomer yaitu catechin, epicatechin, epigallocatechin, dan epicatechin gallate (Rahim, 2007). Indonesia mempunyai hutan mangrove yang cukup luas, yang diperkirakan luasnya sekitar 4,255 juta hektar yang tersebar di sepanjang pantai dan muara-muara sungai. Hutan mangrove merupakan hutan yang tumbuh pada tanah lumpur, aluvial di daerah pantai dan muara

sungai yang dipengaruhi oleh pasang surut air laut. Kulit pohon bakau yang dikeringkan atau dihancurkan dan dibuat menjadi tepung, rata-rata mengandung tanin 20-30% dan kadar tanin tersebut tergolong cukup tinggi (Sukardjo, 1978). Kabupaten Cilacap merupakan salah satu wilayah yang terdapat ekosistem hutan payau mangrove. Salah satu jenis mangrove yang terdapat di wilayah ini adalah *Rhizophora stylosa*. Mangrove [Segara Anakan](#) adalah hutan mangrove yang terletak di Kabupaten Cilacap. Luas Mangrove [Segara Anakan](#) sebesar 6.716 Ha (Purwanto, 2015). Menurut Syawala (2013), jarak penanaman antar mangrove yang ideal adalah 2m x 2m. Jika 20% pohon mangrove di Mangrove Segara Anakan dimanfaatkan sebagai pewarna alami dan dalam 1 pohon mangrove dapat menghasilkan 2 kg buah mangrove, maka akan di dapatkan 1,68 juta kg tanin yang akan dijadikan zat warna alami. Untuk proses

pewarnaan batik diperlukan rasio zat warna dan air yaitu 2 gram/liter (Pringgenies, 2011). Setiap 500 gram kain diperlukan 10 liter campuran zat warna alami. Sehingga dengan dasar ini bisa didapatkan 83,95 juta gram kain batik. Dengan melihat banyaknya tanin yang dapat dihasilkan untuk pewarna alami, maka mangrove *Rhizophora stylosa* ini berpotensi untuk dijadikan pewarna alami untuk batik. Perkembangan teknologi zat warna yang semakin pesat menyebabkan pemakaian zat warna alami tergeser oleh pemakaian zat warna sintetis. Namun pemakaian zat warna sintetis dapat mengakibatkan beberapa masalah, selain dapat mencemari lingkungan pemakain zat warna sintetis juga dapat mengakibatkan kanker. Oleh karena itu, pemakaian zat warna alami dalam proses pewarnaan batik menjadi salah satu solusi sebagai zat warna yang ramah lingkungan. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk membuat dan mengaplikasikan ekstrak zat warna alami dari buah *Mangrove* jenis *Rhizophora stylosa* dalam skala pilot plan untuk pewarnaan batik.

TINJAUAN PUSTAKA

Zat warna alami adalah zat warna yang diperoleh dari alam atau tumbuhan baik secara langsung maupun tidak langsung. Secara tradisional zat warna alami diperoleh dengan ekstraksi atau perebusan tanaman. Bagian – bagian tanaman yang dapat digunakan untuk zat warna alami antara lain kulit, ranting, daun, akar, bunga, dan biji. Dalam buah mangrove banyak mengandung tanin yang merupakan zat warna alami berwarna coklat. Tanin dapat digunakan untuk pewarna batik. Menurut sumber diperolehnya zat warna tekstil digolongkan menjadi 2 yaitu: pertama, Zat Pewarna Alam (ZPA) yaitu zat warna yang berasal dari bahan-bahan alam pada umumnya dari hasil ekstrak tumbuhan atau hewan. Kedua, Zat Pewarna Sintesis (ZPS) yaitu Zat warna buatan atau sintesis dibuat dengan reaksi kimia dengan bahan dasar ter arang batu bara atau minyak bumi yang merupakan hasil senyawa turunan hidrokarbon aromatik seperti *benzena*, *naftalena* dan *antrasena* (Isminingsih, 1978). Teknologi yang telah dikembangkan pada proses pengambilan zat warna alami adalah menggunakan proses ekstraksi. Ekstraksi adalah proses pengambilan solute/zat terlarut dalam suatu bahan menggunakan pelarut yang sesuai. Tujuan ekstraksi bahan alam adalah untuk menarik komponen kimia yang terdapat pada bahan alam. Ekstraksi ini didasarkan pada prinsip perpindahan massa komponen zat ke dalam

pelarut, dimana perpindahan mulai terjadi pada lapisan antar muka kemudian berdifusi masuk ke dalam pelarut (Harbone, 1987; Dirjen POM, 1986). Batik merupakan salah satu dari kebudayaan Indonesia yang berupa kain bermotif. Proses pewarnaan dan pembuatan batik meliputi: Proses Mordanting, proses ini dimaksudkan untuk meningkatkan daya tarik zat warna alam terhadap bahan tekstil serta berguna untuk menghasilkan kerataan dan ketajaman warna yang baik (Fitrihana N, 2007). Proses pewarnaan, proses ini dilakukan dengan pencelupan kain yang sebelumnya telah diberi motif dengan malam pada zat warna. Sebelum diwarnai kain dibasahi dulu dengan Turkish Read Oil (TRO) yang dilarutkan dalam air untuk membuka pori-pori (Purwaningrum, 2007). Proses fiksasi (Penguncian warna). Proses penguncian warna dilakukan setelah bahan dicelup dengan zat warna alam agar warna memiliki ketahanan luntur yang baik. Ada 3 jenis larutan *fixer* yang biasa digunakan yaitu tunjung (FeSO_4), tawas, atau kapur tohor (CaCO_3) (Fitrihana N, 2007). Proses Penghilangan Lilin Batik. Proses ini dilakukan untuk menghilangkan lilin pada kain batik setelah pewarnaan kain. Lilin batik dihilangkan secara keseluruhan dari permukaan kain dengan memasukkan kain ke dalam larutan kanji mendidih sampai semua lilin terlepas dari kain.

METODE PENELITIAN

1. Bahan – Bahan yang Digunakan

- Buah mangrove jenis *Rhizophora stylosa* diperoleh dari daerah Pasar Banggi, Rembang
- Air diperoleh dari Laboratorium Aplikasi Teknik Kimia, Universitas Sebelas Maret.
- Kain mori primisima yang sudah dimordan dan diberi motif dengan lilin batik, diperoleh dari Pabrik Batik Sido Mulyo, Semarang, Surakarta
- Tawas, dan tunjung (FeSO_4), kapur, diperoleh dari toko Utama, Klerwer, Surakarta.
- Kalium permanganat (KMnO_4), Asam oksalat ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$), dan Asam Sulfat (H_2SO_4) diperoleh dari Laboratorium Aplikasi Teknik Kimia, Universitas Sebelas Maret.

2. Rangkaian Alat Ekstraktor dan Evaporator



Gambar 1. Ekstraktor & Evaporator

Keterangan :

- | | |
|--------------------|----------------------|
| 1. Tangki | 9. Gelas penduga |
| 2. Pendingin balik | 10. Roda |
| 3. Statif | 11. Engsel |
| 4. Motor | 12. Tangki Penyaring |
| 5. Pulley | 13. Baffle |
| 6. Kompor | 14. Pengaduk |
| 7. Gas LPG | 15. Support |
| 8. Wadah | |

A = volume KMnO_4 untuk titrasi sampel tanin (mL)

B = volume KMnO_4 untuk titrasi sampel blanko (mL)

N = normalitas KMnO_4

3. Cara Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan memasukan bahan sebanyak 1 kg kedalam tangki ekstraktor evaporator pada bagian tangki penyaring kemudian memasukkan air ke dalam tangki ekstraktor evaporator sebanyak 10 liter atau sampai tanda batas pada gelas penduga. Menjaga keadaan temperatur 100°C selama 1 jam untuk proses ekstraksi, ketika temperatur mencapai 100°C . Mengekstraksi dan menguapkan air yang terkandung dalam ekstrak, hingga didapatkan ekstrak yang pekat. Pada analisa kadar tanin dilakukan dengan titrasi permanganometri dengan indicator indigokarmin. Kadar tanin dihitung dengan rumus :

% tanin

$$= \frac{V_2/V_1 \times (A - B) \times N \times 0,00416}{\text{sampel (gram)}} \times 100\%$$

dengan :

V_2 = volume ekstrak

V_1 = volume ekstrak yang dititrasi

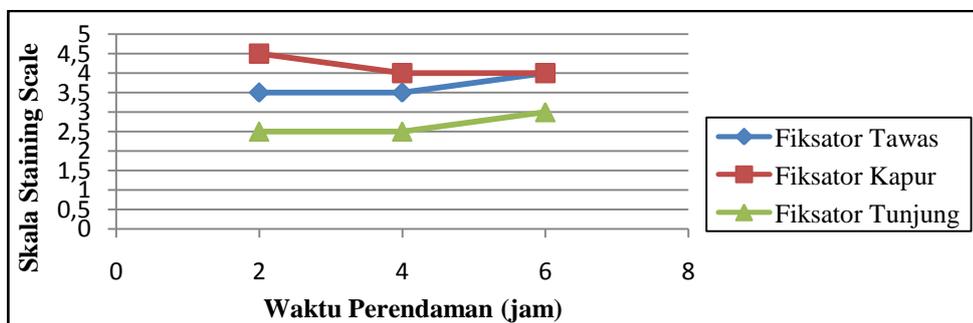
Pengaplikasian pada kain batik dilakukan dengan cara pencelupan dan perendaman kain batik ke dalam kain batik selama 2 jam, 4 jam dan 6 jam. Kemudian mengeringkan kain yang telah direndam di tempat yang teduh. Proses fiksasi pada kain batik setelah direndam dalam zat warna alami dari buah mangrove dilakukan dengan cara membuat larutan fixer dari tawas, kapur tohor, dan tunjung (FeSO_4). Larutan fixer dibuat dengan cara melarutkan 5 gram fixer ke dalam 100 ml dan merendam kain selama 20 menit. Setelah itu dilakukan proses penghilangan lilin batik dengan larutan kanji yang dibuat dengan cara melarutkan 2 gram kanji dalam 1 Liter air dan direbus sampai mendidih. Setelah lilin dihilangkan kemudian mencuci kembali kain dan mengeringkan di tempat yang teduh. Untuk mengetahui ketahanan luntur warna kain yang dihasilkan, dilakukan pengujian berupa uji gosokan dan uji pencucian terhadap masing – masing kain yang telah difiksasi. Uji gosokan dibedakan menjadi dua yaitu gosokan basah dan gosokan kering yang dilakukan dengan menggunakan alat *crockmeter*. Sedangkan untuk uji pencucian dilakukan dengan menggunakan alat *lauderometer*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

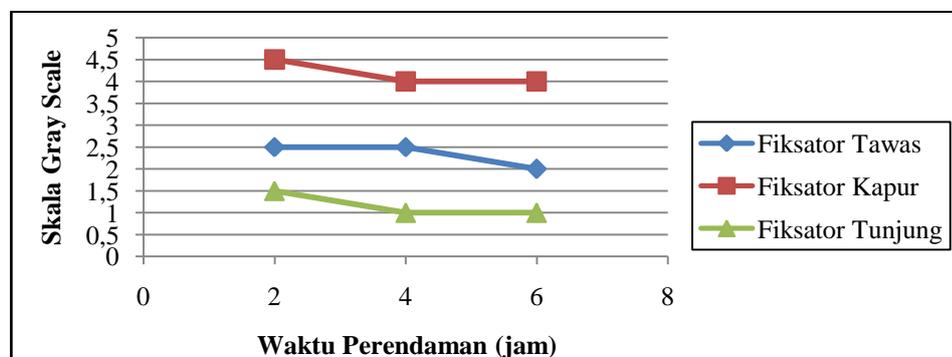
Hasil penelitian Pembuatan Zat Warna Alami dari Buah Mangrove (*Rhizophora Stylosa*) sebagai Pewarna Batik dalam Skala Pilot Plan di

dapatkan kadar air dalam buah mangrove spesies *Rhizophora stylosa* adalah sebesar 31,66 % . Ekstraksi menggunakan alat ekstraktor evaporator diperoleh volume ekstrak pekat dengan volume 6 L dan kadar tanin dalam buah mangrove *Rhizophora stylosa* adalah 0,1774%. Hasil pengujian zat warna dari buah mangrove jenis *Rhizophora stylosa* pada kain batik dilakukan dengan empat cara yaitu pengujian kelunturan warna pada kain terhadap pencucian dengan Staining Scale (SS/CD), pengujian kelunturan zat warna pada kain terhadap pencucian dengan Gray Scale (GS/SS), pengujian kain terhadap gosokan kering dengan Staining Scale (SS/CD), dan pengujian kain terhadap gosokan basah dengan Staining Scale (SS/CD). Proses pengujian terhadap pencucian menggunakan alat yang disebut laundrymeter,

sedangkan proses pengujian terhadap gosokan menggunakan alat yang disebut crockmeter. Dari proses pengujian zat warna pada kain yang telah dilakukan maka didapatkan hasil pengujian zat warna yang dapat terlihat pada Gambar 2 untuk hasil kelunturan warna terhadap pencucian dengan Staining Scale (SS/CD). Hasil uji kelunturan warna terhadap pencucian dengan Gray Scale (GS/CD) dapat dilihat pada Gambar 3. Hasil pengujian kain terhadap gosokan kering dengan Staining Scale (SS/CD) dapat dilihat dari Gambar 4. Sedangkan hasil pengujian kain terhadap gosokan basah dengan Staining Scale (SS/CD) dapat dilihat pada Gambar 5.



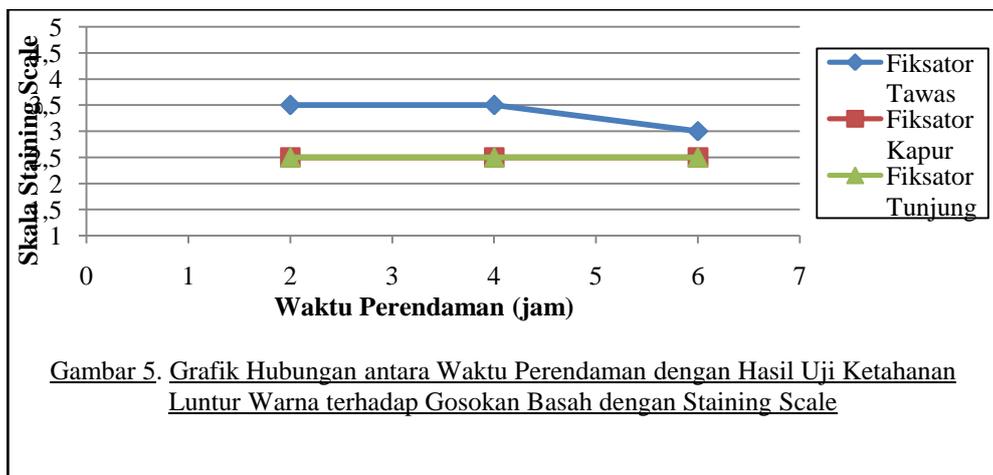
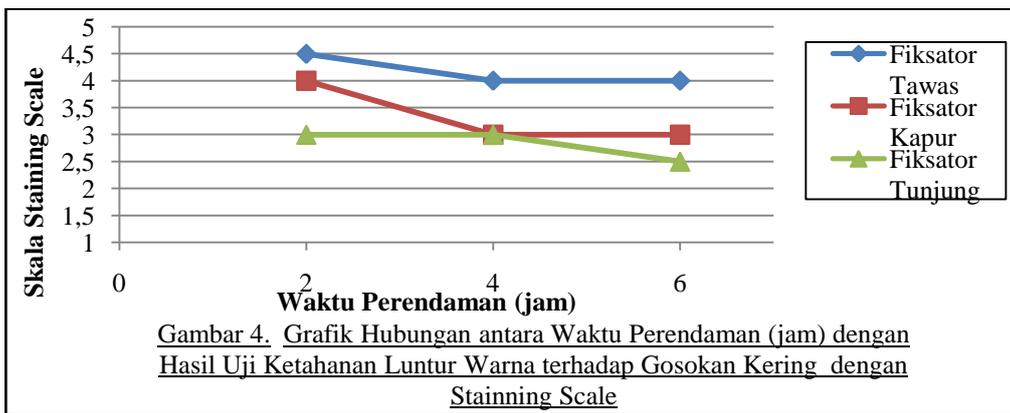
Gambar 2. Grafik Hubungan antara Waktu Perendaman dengan Hasil Uji Ketahanan Warna terhadap Pencucian dengan Staining Scale



Gambar 3. Grafik Hubungan antara Waktu Perendaman dengan Hasil Uji Ketahanan Luntur Warna terhadap Pencucian dengan Gray Scale

Dari hasil analisa pengerjaan tahan uji warna terhadap kelunturan yang disajikan dalam Gambar 2. dan 3, diperoleh hasil bahwa pada pengujian kain menggunakan skala abu-abu, kain yang mempunyai ketahanan luntur terhadap pencucian baik dengan *Gray Scale* maupun *Staining Scale* adalah kain yang di fiksasi menggunakan fiksator kapur karena mempunyai nilai ketahanan luntur yang BAIK dalam semua variasi waktu pencelupan yang dilakukan yaitu 2 jam, 4 jam, dan 6 jam. Pengujian tahan luntur warna terhadap gosokan dimaksudkan untuk menentukan penodaan kain berwarna pada kain lain yang disebabkan karena gosokan. Prinsip pengerjaannya, yaitu dengan menggosokkan kain putih kering atau basah yang telah dipasang pada

Crockmeter dengan ukuran kain putih 5 x 5 cm. penodaan pada kain putih dinilai dengan menggunakan standar skala penodaan. Dari hasil analisa pengujian tahan luntur warna terhadap gosokan kering yang disajikan dalam Gambar 4, kain yang mendapatkan hasil BAIK adalah kain yang difiksasi menggunakan fiksator tawas pada waktu pencelupan 2 jam. Pada pengujian tahan luntur warna terhadap gosokan basah yang disajikan dalam Gambar 5, mempunyai nilai BAIK, nilai maksimal hanya CUKUP BAIK. Gambar 4 Hasil Uji Ketahanan Luntur Warna terhadap Gosokan Kering dengan *Staining Scale*.



Dari analog pengujian pada Gambar 2, 3, 4 dan 5 dapat disimpulkan bahwa kain yang difiksasi menggunakan larutan tawas hasilnya berbentuk uji tahan luntur dan uji tahan gosokan, baik gosokan kering maupun gosokan basah.

Keterangan : SS = Staining Scal
 CD = Color Different
 GS = Gray Scale

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa proses ekstraksi secara *batch* dalam skala pilot plant dengan berat mangrove jenis *Rhizophora stylosa* sebesar 1 kg, volume pelarut 10 L, suhu ekstraksi 100 °C, dan waktu ekstraksi 1 jam, hasil ekstrak zat warna yang diperoleh adalah 6 L dan kadar tanin dalam buah mangrove *Rhizophora stylosa* adalah 0,1774%. Sedangkan hasil pengujian terhadap luntur kain yang telah dicelup zat warna dengan berbagai fiksator seperti tawas, kapur dan tunjung didapatkan fiksator tawas yang baik terhadap uji gosokan dan fiksator kapur baik terhadap uji pencucian.

DAFTAR PUSTAKA

1. Asrina, N dan Chusnayni, V., 2014, "Pembuatan dan Aplikasi Zat Warna Alami dari Buah Mangrove Jenis *Rhizophora stylosa*", Universitas Sebelas Maret : Surakarta.
2. Danarto, Y.C., dkk, 2010, "Pengambilan Tanin dari Kulit Kayu Bakau dan Pemanfaatannya sebagai Adsorben Logam Berat Timbal (Pb) dan Tembaga (Cu)", Universitas Muhammadiyah Surakarta : Surakarta.
3. Fitriana, N., 2007, "Teknik Eksplorasi Zat Pewarna Alam dari Tanaman Di Sekitar Kita Untuk Pencelupan Bahan Tekstil". Jakarta
4. Kwartiningsih, E., dkk, 2013, "Ekstraksi Tanin dari Buah Mangrove (*Rhizophora mucronata*)", Simposium Nasional RAPI XII, No.ISSN 1412-9612.
5. Moerdoko, W., 1975. *Evaluasi tekstil bagian kimia*. Bandung : ITT.
6. Noor., 1999, "Taksonomi dan Morfologi *Rhizophora stylosa*". Universitas Sumatera Utara: Sumatera.
7. Pringgenies, D. 2011. *Aplikasi Pewarnaan Bahan Alam Mangrove Untuk Bahan Batik Sebagai Diversifikasi Usaha Di Desa Binaan Kabupaten Semarang*. Semarang :Jurusan Ilmu Kelautan Universitas Diponegoro
8. Purwanto, D., A. 2015. *Analisis Sebaran Dan Kerapatan Mangrove Menggunakan Citra Landsat 8 Di Segara Anakan, Cilacap*. Jakarta : LAPAN
9. Purwaningrum., Safitri, D., 2007, "Pengaruh Lama Waktu Mordan Tawas terhadap Ketahanan Warna dan Kekuatan Tarik Kain Sutera dalam Proses Pewarnaan dengan Zat Warna Daun Mangga pada Busana Pesta Anak". Jurusan Teknologi Jasa dan Produksi Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang.
10. Rahim, A., A., Rocca, E., J. Steinmetz, Adnan and Sani, I. 2007. *Mangrove Tannins and Their Flavonoid Monomers as Alternative Steel Corrosion Inhibitors in Acidic Medium*. Dalam : *Corrosion Science*. 49. pp. 402-417.
11. Reni, P dan Febriana, T., 2014, "Pembuatan Zat Warna Alami dari Buah Mangrove Jenis *Rhizophora stylosa* dalam Bentuk Bubuk sebagai Pewarna Batik", Universitas Sebelas Maret : Surakarta.
12. Revita, S.A.A dan Nurjayanti, Y.P., 2014, "Zat Warna Alami dari Buah Mangrove Jenis *Rhizophora mucronata*", Universitas Sebelas Maret : Surakarta.
13. Schofield, P., Mbugua., D.M. and Pell, A.N. 2001. *Analysis of Condensed Tannins, a Review, Animal Feed Science and Technology*. 91. pp. 21-40.
14. Sukardjo, S. 1978. *Some Aspects of Mangrove Ecology and Training Materials for Forestry Officers*. Rome : Integrated Development of the Sundarbans Reserved Forest
15. Syawala, N. 2013. *Komposisi Vegetasi Hutan Mangrove Di Pantai Mojo Kecamatan Ulujami Kabupaten Pemalang Provinsi Jawa Tengah*. Surakarta: Universitas Muhammadiyah Surakarta

KONSENTRASI FAKTOR PADA BIOAKUMULASI PLUTONIUM OLEH SIPUT MACAN (*Babylonia spirata L.*) DI PERAIRAN TELUK JAKARTA

Murdahayu Makmur⁽¹⁾, Muhammad Qowi Fikri⁽²⁾, Defri Yona⁽³⁾, Syarifah Hikmah JS⁽³⁾

1). Peneliti Radioekologi Kelautan BATAN

2). Mahasiswa Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan Universitas Brawijaya Malang

3). Dosen Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Brawijaya Malang

Email: mdhayu@batan.go.id

ABSTRAK

KONSENTRASI FAKTOR PADA BIOAKUMULASI PLUTONIUM OLEH SIPUT MACAN (*Babylonia spirata L.*) DI PERAIRAN TELUK JAKARTA. Salah satu komoditas hasil laut dari perairan Teluk Jakarta adalah siput macan (*Babylonia spirata L.*). Siput merupakan biota laut yang mempunyai kemampuan untuk mengakumulasi bahan tercemar termasuk cemaran radioaktif. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan siput macan dalam mengakumulasi serta melepaskan plutonium yang merupakan salah satu pencemar radioaktif. Dari hasil penelitian ditemukan nilai Biokonsentrasi Faktor (BCF) plutonium pada siput macan adalah berkisar antara 90.66 - 122.47 ml.g⁻¹ dengan rata-rata 101,26 ml.g⁻¹. Berdasarkan data tersebut, menunjukkan bahwa siput macan mampu mengakumulasi sebesar 101.22 kali konsentrasi plutonium di dalam air laut. Nilai persentase plutonium yang tertahan (retensi) di tubuh siput macan berkisar antara 55.7 - 72.1% dengan rata-rata 62.73±8.45%. Kemampuan retensi plutonium pada siput macan dapat digunakan untuk membuktikan kejadian pencemaran plutonium pada satu wilayah walaupun telah berhenti selama 7 hari.

Kata Kunci: Siput macan, Radionuklida, Plutonium, Bioakumulasi, Depurasi

ABSTRACT

FACTOR CONCENTRATION OF PLUTONIUM BIOACCUMULATION BY TIGER SNAIL (*Babylonia Spirata L.*) FROM THE JAKARTA BAY. Tiger snail (*Babylonia spirata L.*) is one of commodity from the Tanjung Kait Beach which can accumulate various contaminants, including radionuclide contaminant. The purposes of this research was to determine accumulate and depuration ability of plutonium in tiger snail. The Bioconcentration Factor (BCF) of plutonium in the body of tiger snail was ranged from 90.66 - 122.47 ml.g⁻¹ with average value 101.26 ml.g⁻¹. This indicated that the tiger snail was able to accumulate 101.26 times higher than the concentration of plutonium in seawater. The percentage of retention value of plutonium in the body of the tiger snail was ranged from 55.7 - 72.1% with average value 62.73±8.45%. The retention ability of tiger snail can be used to demonstrate plutonium contamination incident although it has been stopped for 7 days.

Keywords : Siput Macan, Plutonium, BCF, Bioaccumulation, Depuration

PENDAHULUAN

Tingginya aktifitas manusia di berbagai sektor, selain meningkatkan kesejahteraan masyarakat dapat juga memberikan tekanan terhadap lingkungan. Apalagi dengan kenaikan jumlah penduduk yang sangat pesat, semakin memperbesar tekanan terhadap kualitas lingkungan akibat meningkatnya limbah padat, cair, gas dari aktifitas manusia tersebut. Hasil pemantauan kualitas lingkungan, memperlihatkan telah terjadi penurunan kualitas air sungai, air tanah dan udara sehingga pencemaran Jakarta sudah mencapai ambang yang cukup serius. (BPLHD DKI Jakarta, 2015). Kawasan perairan Teluk Jakarta merupakan salah

satu kawasan perairan yang mendapat tekanan luar biasa dari aktifitas daratan, sehingga mengalami penurunan kualitas lingkungan. Berbagai macam kegiatan industri, pertanian, transportasi termasuk sampah domestik dan rumah tangga yang tidak terkelola dengan baik menjadi faktor penentu dalam penurunan kualitas lingkungan tersebut.

Penurunan kualitas lingkungan di ekosistem perairan merupakan suatu masalah yang sangat kompleks dan membahayakan bagi organisme dan lingkungan akuatik. Mulai dari pencemar organik dan anorganik, termasuk limbah B3 dan limbah radioaktif yang membahayakan makhluk yang hidup dan

berkembang di perairan tersebut, sampai terdegradasinya lingkungan perairan secara fisik (Budiawan, 2013). Pencemaran perairan dapat terdistribusi secara luas sehingga perlu mendapat perhatian secara khusus karena bersifat toksik dan berbahaya bagi lingkungan hidup. Salah satu limbah radionuklida yang berbahaya karena sifat bioakumulasinya pada organisme akuatik adalah kelompok senyawa antropogenik, termasuk senyawa plutonium salah satunya.

Plutonium berasal dari sumber antropogenik dan secara global dihasilkan karena uji senjata nuklir, operasi reaktor rutin maupun kecelakaan nuklir seperti kecelakaan nuklir Chernobyl (Ukraina, 1986) dan Fukushima Daiichi (Jepang, 2011) dimana keduanya dianggap sebagai kecelakaan besar (*major accident*) dan ditempatkan pada skala 7 berdasarkan *International Nuclear and Diological Event Scale (INES)* (Steinhauser et al, 2014).

Radionuklida plutonium tersebut terjerap di dalam komponen abiotik (air dan sedimen) pada suatu ekosistem perairan laut dan akan memberikan dampak buruk terhadap biota yang hidup di kawasan tersebut.

Pencemaran radionuklida alam dan antropogenik ke suatu lingkungan perairan seperti halnya pencemaran logam berat yang dapat dikategorikan membahayakan, sebab bahan tersebut berdasarkan sifatnya tidak terdegradasi secara fisik, kimia, maupun biologi, melainkan terakumulasi secara biologis oleh suatu organisme yang hidup di lingkungan perairan tersebut (Povinec, 2004). Plutonium yang bersifat sebagai partikel reaktif, cenderung untuk mengendap ke dasar perairan, dan berpotensi terakumulasi pada biota perairan dasar seperti kerang, siput dan ikan dasar lainnya.

Siput macan (*Babylonia spirata L.*) merupakan salah satu biota benthik yang dapat mengakumulasi zat pencemar, termasuk cemaran radionuklida (Yandra et al, 2013). Kecenderungan siput macan yang berkembang biak di dasar perairan akan mampu mengakumulasi bahan pencemar yang terdapat pada dasar perairan termasuk plutonium.

Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) melalui kelompok radioekologi kelautan telah melakukan banyak penelitian tentang studi bioakumulasi dan depurasi

radionuklida terhadap biota laut di Indonesia antara lain bioakumulasi ^{137}Cs , ^{242}Pu oleh berbagai macam biota, antara lain: *Perna viridis*, *Anadara granosa*, *Pomacea canaliculata* dan lainnya. Penelitian mengenai bioakumulasi plutonium oleh siput macan diharapkan dapat menambah *baseline* data tentang bioakumulasi radionuklida terhadap biota laut.

Pada penelitian ini dilakukan studi bioakumulasi dan depurasi plutonium oleh siput macan melalui jalur air laut dengan menggunakan metode biokinetik kompartemen tunggal. Kemampuan bioakumulasi plutonium oleh siput macan penting dipelajari untuk memprediksi perpindahan plutonium dalam lingkungan akuatik yang berakhir pada manusia. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui sifat akumulasi plutonium oleh siput macan menggunakan metode biokinetik kompartemen tunggal serta mengetahui proses depurasi plutonium oleh biota tersebut.

METODOLOGI

Penelitian dilakukan di laboratorium Bidang Radioekologi Kelautan PTKMR BATAN pada Bulan November 2015 sampai dengan Bulan Pebruari 2016. Pengambilan biota dilakukan di perairan Teluk Jakarta dan dibawa sesegera mungkin ke Laboratorium Akuatik untuk mengurangi resiko kematian biota.

Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif untuk menganalisa tingkat kenaikan pengambilan (*uptake*) dan tingkat pelepasan (*depurasi*) kontaminan plutonium pada siput macan. Pendekatan ini dilakukan dengan cara mendeskripsikan tingkat kenaikan konsentrasi ^{242}Pu di hari ke-1 sampai hari ke-19 pada siput macan. Penelitian ini juga mendeskripsikan tingkat pelepasan ^{242}Pu di hari ke-1 sampai hari ke-7 pada siput macan setelah pemaparan dihentikan.

Aklimatisasi Plutonium pada Siput Macan

Proses aklimatisasi bertujuan untuk menghilangkan stres hewan percobaan dalam kondisi akuarium sehingga dapat digunakan dalam percobaan bioakumulasi. Proses

aklimatisasi biota dilakukan dengan menempatkan siput macan pada akuarium air laut, yang dilengkapi dengan sistem sirkulasi, filtrasi dan penghilang buih. Selama proses aklimatisasi, pemberian pakan biota dengan *Artemia sp* dilakukan 3 hari sekali.

Proses Bioakumulasi ^{242}Pu Terhadap Siput Macan

Proses bioakumulasi plutonium oleh siput macan dengan mengambil 39 individu siput macan yang berasal dari akuarium aklimatisasi. Siput kemudian dimasukkan ke dalam 3 akuarium, yang masing-masing berisi sebanyak 13 individu perakuarium. Pemilihan siput berdasarkan kondisi hewan percobaan yang sehat untuk mengurangi resiko kematian biota di tengah percobaan bioakumulasi.

Akuarium untuk proses bioakumulasi berkapasitas 80 liter yang diisi air laut sebanyak 60 liter. Sebelum sampel biota dimasukkan, terlebih dulu akuarium ditambahkan perunut radioaktif ^{242}Pu dengan menggunakan metode pengenceran. Perunut radioaktif digunakan sebagai penandaan (*labelling*) polutan sehingga memudahkan pendeteksian dan percobaan dapat dilakukan secara kontinyu (Fowler *et al*, 2003). Pada penelitian ini, aktifitas ^{242}Pu yang digunakan adalah sebesar 74×10^{-2} Bq/ml. Adapun persamaan metode pengenceran pada perunut radioaktif disajikan pada persamaan (1):

$$(V.N)_{Std} = (V.N)_{smp}$$

Dimana:

V dan N_{std} = Volume dan aktivitas standar (perunut ^{242}Pu)

V dan N_{smp} = Volume dan aktifitas ^{242}Pu pada sampel air dalam akuarium

Perunut ^{242}Pu ditambahkan sebanyak 20 ml ke dalam masing masing akuarium. Proses bioakumulasi dilakukan selama 19 hari dan selama proses tersebut, hewan percobaan tidak diberi makan. Pengambilan dan penimbangan sampel biota dilakukan pada hari ke 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 11, 13, 15, 17 dan ke-19.

Proses Depurasi plutonium Terhadap Siput Macan

Proses depurasi dilakukan dengan menempatkan 21 buah sampel biota percobaan yang telah terpajan ^{242}Pu selama 7 hari ke dalam 3 akuarium dengan kapasitas 60 liter air laut. Pada masing masing akuarium ditempatkan 7 biota. Pengambilan dan penimbangan sampel biota dilakukan setiap hari (1, 2, 3, 4, 5, 6, dan 7 hari) masing-masing diambil sampel sebanyak 1 ekor. Selama proses depurasi, penggantian media air laut kepada biota dilakukan setiap hari

Analisis plutonium dari sampel biota

Sampel biota kemudian dibersihkan, lalu dibakar sampai menjadi arang pada cawan porselen yang sudah diberi label. Arang tersebut diabukan pada suhu 400°C selama 2 jam dengan menggunakan furnace dan didinginkan (dibiarkan) selama 1 malam (12 jam).

Sampel abu pada cawan porselen, dipindahkan ke beaker glass yang telah dilabel, kemudian cawan porselen dibilas dengan sedikit aquadest. Sampel tersebut dipanaskan sampai mendekati kering. Sampel kemudian ditambahkan HClO_4 3-5 tetes dan HNO_3 1 ml, dan dipanaskan kembali sampai mendekati kering. Sampel kemudian dilarutkan dalam $\text{H}_2\text{SO}_4(1+19)$ sebanyak 10 ml dan disaring. Ke dalam larutan ditambahkan 3 tetes timol biru, dan ditambahkan $\text{NH}_4\text{OH}(1+1)$, sehingga diperoleh larutan berwarna kuning (pH 8-9). Ditambahkan $\text{H}_2\text{SO}_4 (1+19)$ sehingga diperoleh larutan berwarna pink (pH2).

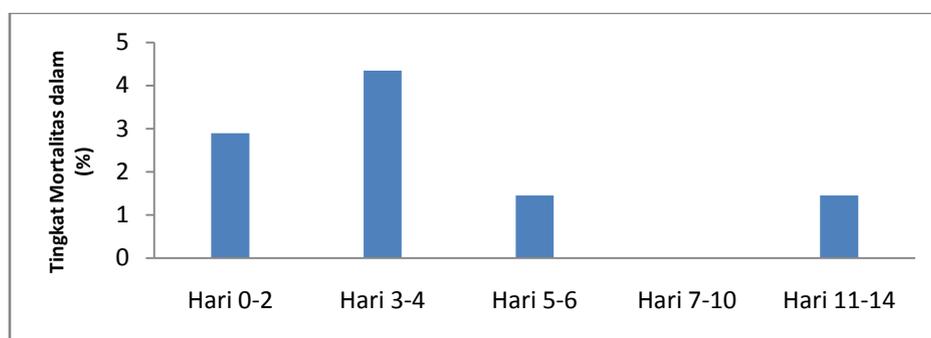
Elektrodeposisi dilakukan dengan besaran arus 10 A selama 2 jam, dimana terjadi proses pelapisan suatu logam atau senyawa logam dari larutan elektrolit pada elektroda dengan bantuan arus listrik searah. Ditambahkan $\text{NH}_4\text{OH}(1+1)$ sebanyak 1 ml pada menit ke 115 untuk menghentikan proses elektrodeposisi. Plat dikeluarkan dari dalam sel dan dibilas dengan akuades dan etanol. Bagian bawah plat dibakar beberapa saat lalu didinginkan untuk dicacah menggunakan sistem pencacah spektrometer alfa.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Aklimatisasi Siput Macan

Sebelum tahap eksperimen, dilakukan proses aklimatisasi biota dengan tujuan menghilangkan stres pada biota serta memperoleh kondisi biota yang optimal dalam percobaan bioakumulasi dan mampu bertahan

pada kondisi akuarium. Proses aklimatisasi dilakukan selama 14 hari tanpa pemberian perunut ^{242}Pu . Hasil aklimatisasi ditunjukkan pada rasio tingkat mortalitas biota pada saat penyesuaian hidup 14 hari seperti ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Rasio tingkat mortalitas siput macan pada proses aklimatisasi

Berdasarkan Gambar 1, pada hari 0-2 aklimatisasi terjadi kematian 2 biota atau sebesar 2,89% dari total populasi. Didiari 3-4, terjadi kematian 3 biota atau sebesar 4,35% dari total populasi. Didiari 5-6, terjadi kematian 1 biota atau sebesar 1,45% dari total populasi dan pada hari 7-10, tidak terjadi kematian biota. Pada hari ke-11 sampai dengan hari ke-14, terjadi satu kematian biota atau sebesar 1,45% dari total populasi. Jadi, dapat dikatakan bahwa siput macan mempunyai kemampuan beradaptasi dengan lingkungan laboratorium yang dibuktikan dengan jumlah persentase kemampuan hidup (viabilitas) biota tersebut sebesar 89,86%. Adapun jumlah persentase total kematian (mortalitas) selama proses aklimatisasi biota sebesar 10,14% dari total keseluruhan populasi yang dilakukan dalam kurun waktu selama 14 hari.

Aktifitas ^{242}Pu pada Air Laut di Akuarium Bioakumulasi

Pengukuran aktifitas ^{242}Pu pada perairan laut di akuarium bioakumulasi dilakukan di Laboratorium Akuatik dengan menggunakan metode pengenceran pada perunut radioaktif ^{242}Pu . Pada penelitian ini, aktifitas radioaktif pada akuarium ke-1, ke-2 dan ke-3 proses

bioakumulasi ^{242}Pu pada siput macan sebesar $2,47 \times 10^{-4}$ Bq/ml atau 0,247 Bq/l air laut.

Pemberian perunut ^{242}Pu harus diatur agar tidak boleh melebihi batas tertinggi dalam regulasi lepasan radionuklida ke dalam lingkungan dikarenakan sifat dari ^{242}Pu memiliki waktu paruh yang sangat panjang di lingkungan perairan (Sakaguchi *et al*, 2012). Perunut ^{242}Pu juga memancarkan radiasi alfa (α) yang memiliki dampak kerusakan paling tinggi dibandingkan radiasi beta (β) dan gamma (λ).

Proses Bioakumulasi plutonium oleh Siput Macan

Unsur radionuklida pemancar alfa memerlukan tahapan-tahapan perlakuan yang kompleks sebelum dilakukan pencacahan dengan spektrometer alfa seperti pemberian perunut, pengabuan, evaporasi, pemisahan, pemurnian dan elektrodeposisi. Hasil elektrodeposisi plutonium diukur dengan spektrometer alfa. Plutonium akan memberikan sinyal yang sangat lemah pada detektor, untuk itu pengukuran membutuhkan waktu yang cukup lama, yaitu sekitar 250.000 detik. Berikut adalah data konsentrasi faktor (CF) pada proses *uptake* plutonium (^{242}Pu) pada siput macan pada

akuarium ke-1, ke-2, dan ke-3 yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1 menunjukkan konsentrasi faktor plutonium pada siput macan yang menggunakan bobot rata-rata biota. Pada hari ke-1, nilai faktor konsentrasi berkisar antara 8,99 ml.g^{-1} sampai dengan 12,5 ml.g^{-1} . Nilai tersebut terus meningkat dan cenderung mengalami kesetimbangan (*steadystate*). Kondisi

kesetimbangan (*steadystate*) adalah suatu kondisi dimana siput macan telah mencapai batas tertinggi akumulasi plutonium pada tubuhnya. Nilai faktor konsentrasi mencapai nilai tertinggi pada kisaran 100,29 ml.g^{-1} sampai dengan 102,33 ml.g^{-1} . Berdasarkan data tersebut, menunjukkan bahwa siput macan mampu mengakumulasi sebesar 100,29 sampai dengan 102,33 kali konsentrasi plutonium di dalam air laut per gram bobot biota.

Tabel 1. Data Konsentrasi Faktor (CF) Pada Proses Uptake²⁴²Pu oleh Siput Macan dalam satuan (ml.g^{-1})

Hari Pemaparan	Nilai Konsentrasi faktor (CF) pada akuarium ke-1, ke-2 dan ke-3 (ml.g^{-1})			Rerata
1	12,5	8,99	10,91	10,8±1,76
2	20,33	18,97	24,68	21,33±2,98
3	22,12	24,33	20,24	22,23±2,05
4	27,64	33,98	22,79	28,14±5,61
5	29,05	32,21	35,51	32,26±3,23
6	36,45	35,29	28,59	33,44±4,24
7	43,21	42,33	48,33	44,62±3,24
9	45,31	54,77	47,66	49,25±4,93
11	60,67	69,04	59,01	62,91±5,37
13	73,8	71,22	75,19	73,40±2,01
15	89,29	93,56	84,23	89,03±4,67
17	98,08	99,81	97,21	98,37±1,32
19	100,29	101,05	102,33	101,22±1,03

Implementasi dari hasil percobaan ini adalah bahwa jika terjadi pencemaran unsur plutonium di perairan laut Tanjung Kait, maka setelah 1 hari konsentrasi plutonium pada siput macan mencapai 8,99 sampai dengan 12,5 kali lebih banyak jika dibandingkan dengan konsentrasi plutonium di dalam air laut. Jika kontaminasi zat radionuklida tersebut masih berlangsung, maka dalam pada hari ke-19, konsentrasi plutonium pada siput macan akan meningkat menjadi 100,29 sampai dengan 102,33 kali, dibandingkan dengan konsentrasi

plutonium dalam air laut. Hal ini juga diperkuat oleh pernyataan Fowler (2013) yang beranggapan bahwa nilai konsentrasi plutonium pada biota bentik berkisar antara 100-200 kali, yang artinya biota bentik mampu mengakumulasi sebanyak 100-200 kali konsentrasi plutonium di dalam air laut.

Kemampuan siput macan dalam mengakumulasi bahan lain seperti logam berat pernah diteliti oleh Umbara dan Suseno (2003) dimana ditemukan bahwa siput macan dapat

mengakumulasi logam berat Pb dan Cd sebesar 122,71 dan 100,79. Nilai ini tidak berbeda jauh dengan kemampuan bioakumulasi siput macan terhadap plutonium yang dilakukan pada penelitian ini yaitu sebesar 100,29 sampai dengan 102,33 kali. Bioakumulasi plutonium tertinggi pada siput macan terjadi pada hari ke 11 sampai dengan hari ke 15, dimana peningkatan konsentrasi faktor (CF) sebesar $15,43 \text{ ml.g}^{-1}$, $22,34 \text{ ml.g}^{-1}$ dan $16,18 \text{ ml.g}^{-1}$ untuk 3 bak percobaan.

Pada data tersebut juga menunjukkan sempat terjadinya penurunan nilai konsentrasi faktor (CF) yang dialami oleh siput macan dalam proses pengambilan (*uptake*) kontaminan. Penurunan nilai konsentrasi faktor (CF) pada akuarium kedua yang terjadi pada hari ke-4 dan ke-5, dengan nilai penurunan sebesar $1,77 \text{ ml.g}^{-1}$. Pada akuarium ketiga juga mengalami penurunan nilai konsentrasi faktor (CF), yang terjadi pada hari ke-5 dan ke-6, dengan nilai penurunan sebesar $6,92 \text{ ml.g}^{-1}$. Hal ini dikarenakan kemampuan masing-masing individu siput macan dalam pengambilan kontaminan berbeda-beda. Ada banyak faktor yang menjadikan perbedaan kemampuan individu siput macan dalam pengambilan kontaminan, antara lain: usia, bobot tubuh, enzim, jenis kelamin serta keaktifan biota tersebut dalam mengambil (*uptake*) dan melepaskan (eliminasi) kontaminan (Fowler, 2013).

Pada minggu pertama (hari ke-1 sampai dengan hari ke-7), kenaikan nilai konsentrasi (CF) plutonium oleh siput macan berkisar antara $42,33 \text{ ml.g}^{-1}$ sampai dengan $48,33 \text{ ml.g}^{-1}$. Pada minggu kedua (hari ke-9 sampai dengan hari ke-13), kenaikan nilai konsentrasi (CF) berkisar antara $16,45 \text{ ml.g}^{-1}$ sampai dengan $28,49 \text{ ml.g}^{-1}$. Sedangkan pada minggu ketiga (hari ke-15 sampai dengan hari ke-19), kenaikan nilai konsentrasi (CF) berkisar antara $7,49 \text{ ml.g}^{-1}$ sampai dengan $18,1 \text{ ml.g}^{-1}$. Berdasarkan data tersebut, pada minggu pertama, siput macan memiliki kemampuan akumulasi ^{242}Pu tertinggi dibandingkan dengan minggu kedua dan ketiga. Hal ini dikarenakan, pada awal pemaparan (minggu kesatu) kemampuan biota mengakumulasi kontaminan sangat tinggi. Pada tengah dan akhir (minggu kedua dan ketiga) pemaparan, mengalami penurunan kemampuan akumulasi dan memasuki fase *steadystate* (Suseno, 2011).

Plutonium merupakan salah satu unsur golongan aktinida yang mempunyai masa partikel lebih berat yang menyebabkan unsur ini cenderung lebih cepat tenggelam ke dasar sedimen dan mengendap ke dalam substrat (sedimen), sehingga jarak perpindahan dari unsur plutonium cenderung lebih pendek dari unsur lainnya (Makmur, 2007). Povinec dan Livingstone (2000) mengatakan bahwa aktifitas radionuklida di dalam perairan laut ditentukan oleh beberapa faktor yaitu persebaran, perpindahan, pengadukan air laut (*mixing*) dan peluruhan radionuklida.

Radionuklida yang masuk ke dalam lingkungan perairan mengalami pengendapan dan diserap oleh organisme di perairan tersebut. Biota benthik, termasuk siput macan atau *Babylonia spirata L.* yang hidup di dasar perairan memiliki peluang mengakumulasi plutonium lebih tinggi dibandingkan biota laut yang lainnya (pelagis) dikarenakan plutonium dapat mengendap dan menjerap (*scavenging*) di dalam sedimen laut (Hirose dan Aoyama 2003). Siput macan (*Babylonia spirata L.*) merupakan salah satu organisme air yang hidup menetap dan memiliki sifat *filter feeder* serta mampu berkembang biak pada tekanan ekologis yang tinggi sesuai dengan sifatnya (Giffari, 2011). Semakin besar kemampuan dari suatu organisme dalam mengakumulasi kontaminan, maka semakin baik pula organisme tersebut digunakan sebagai indikator kualitas dari suatu lingkungan perairan. Pernyataan tersebut dipertegas oleh Nitisupardjo (1998) yang menyatakan bahwa semakin baik suatu organisme menyerap kontaminan, maka semakin besar indeks faktor konsentrasinya.

Secara khusus bioindikator organisme laut dapat didefinisikan sebagai spesies yang dapat beradaptasi terhadap keadaan pencemaran tertentu, keberadaannya dalam suatu wilayah mencirikan adanya pencemaran dan mampu mengakumulasi pencemar yang berada dalam jumlah runtuhan dalam lingkungan (Suseno, 2011). Berdasarkan hal tersebut maka hampir seluruh invertebrata laut khususnya *gastropoda* dapat digunakan sebagai bioindikator.

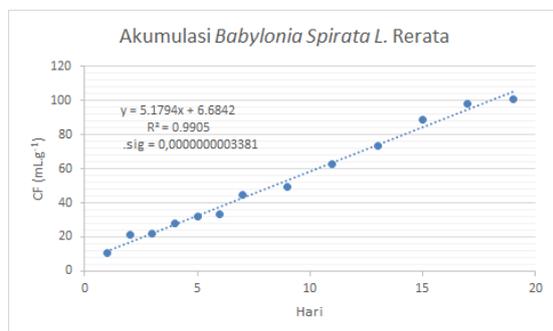
Pengambilan kontaminan plutonium oleh siput macan dipengaruhi oleh beberapa faktor, salah satunya adalah dari ukuran tubuh biota tersebut. Perbedaan tersebut disebabkan kemampuan pengambilan kontaminan untuk

gastropoda berukuran kecil lebih cepat dibandingkan yang berukuran lebih besar. Ukuran tubuh *gastropoda* yang kecil (berusia muda) lebih cepat mengambil kontaminan dibandingkan dengan ukuran tubuh yang lebih besar (berusia lebih tua), sehingga lebih cepat mengalami proses *steadystate* (Nakahara dan Nakamura, 2004). Walaupun ukuran tubuh lebih kecil, tetapi luas permukaan, rasio volume dan konsentrasi enzim turut memainkan peranan yang sangat penting. Pada *gastropoda* yang memiliki tubuh lebih besar (berusia lebih tua) memiliki kemampuan mengambil jumlah kontaminan lebih banyak dibandingkan ukuran yang lebih kecil (berusia muda) sehingga biota yang memiliki ukuran tubuh lebih besar (berusia lebih tua) dapat menyimpan dan mengakumulasi kontaminan yang lebih banyak dibandingkan dengan biota yang memiliki ukuran tubuh lebih kecil (berusia muda). Unsur radionuklida diambil oleh organisme laut dari dalam air dan sedimen melalui lebih dari satu jalur transportasi dan secara fisik dipengaruhi oleh luas permukaan hewan tersebut, antara lain (Campbell, 2002):

- *Transport carrier mediated* dimana unsur radionuklida berikatan dengan protein
- Transportasi melalui protein pembawa di mana saluran membran sel (*membran channel*) yang mengandung protein dengan inti hidrofobik yang dapat dilalui oleh radionuklida.

Hubungan Nilai Konsentrasi Faktor (CF) dengan Lamanya Pemaparan

Berikut adalah pemodelan kemampuan bioakumulasi rerata ^{242}Pu terhadap siput macan yang disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Kemampuan Bioakumulasi Rerata ^{242}Pu Pada siput macan

Berdasarkan Gambar 2, diperoleh persamaan garis lurus rerata Bioakumulasi ^{242}Pu dari ketiga macam siput macan sebagai berikut:

- $Y_{\text{rerata}} = 5,1794x + 6,6842$
 $R^2 = 0,9905$ (2)

Berdasarkan persamaan garis lurus di atas dapat ditentukan nilai kemiringan (*slope*) yang merupakan konstanta total *uptake* kontaminan (*ku*). Nilai *ku* rerata akumulasi dari berbagai macam siput macan yang diperoleh yaitu 5,179.

Pada Gambar 2, Nilai *ku* ini menunjukkan bahwa setiap bertambahnya setiap hari pemaparan, maka akan bertambahnya nilai konsentrasi faktor rerata pada penelitian ini sebesar 5,179. Nilai R^2 pada model akumulasi ^{242}Pu rerata pada siput macan ini sebesar 0,9905 (99%) dengan nilai *.sig* 0,0000000003381 sehingga kemampuan variabel bebas dalam menjelaskan varians dari variabel terikatnya dikategorikan baik dan model yang dihasilkan signifikan. Hal ini berarti peningkatan nilai konsentrasi faktor (CF) ^{242}Pu pada siput macan dengan lamanya waktu pemaparan menunjukkan hubungan positif artinya semakin lamanya waktu pemaparan, maka jumlah nilai konsentrasi faktor akan semakin meningkat.

Proses Depurasi plutonium oleh siput macan Kemampuan siput macan dalam Melepaskan Kontaminan plutonium

Depurasi adalah proses pembersihan dari biota air laut maupun air tawar dimana biota tersebut ditempatkan ke dalam lingkungan air bersih (bebas kontaminan) untuk periode waktu untuk memungkinkan pembersihan kotoran. Pengukuran depurasi kontaminan pada siput macan dilakukan selama 7 kali dalam 7 hari dengan sistem pengukuran yang samadengan saat proses pengambilan (*uptake*) kontaminan. Pada pemilihan bioindikator, data proses depurasi polutan dalam tubuh biota percobaan mutlak diperlukan. Data percobaan depurasi plutonium dari siput macan yang direpresentasikan sebagai persen retensi ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Data Percobaan Depurasi ^{242}Pu dari siput macan yang direpresentasikan Sebagai Persen Retensi

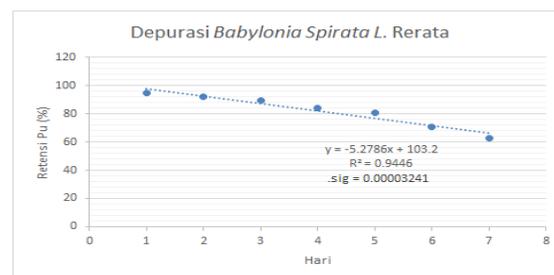
Hari	Pengulangan Kesatu	Pengulangan Kedua	Pengulangan Ketiga	Rerata
0	100 %	100 %	100 %	100 %
1	98,5 %	95,6 %	90,7 %	94,93±3,94 %
2	97,3 %	90,8 %	88,2 %	92,1±4,69 %
3	90,7 %	87,3 %	89,9 %	89,3±1,78 %
4	87,6 %	80,2 %	84,1 %	83,97±3,7 %
5	84,3 %	78,9 %	79,3 %	80,83±3 %
6	76,5 %	70,5 %	65,2 %	70,73±5,65 %
7	60,4 %	72,1 %	55,7 %	62,73±8,45 %

Pada Tabel 2 menunjukkan setelah satu hari pemaparan plutonium dihentikan maka siput macan tersebut akan mengekresikan plutonium yang beradadi dalam jaringan hewan tersebut sebesar 1,5 sampai dengan 9,3%. Setelah 7 hari pemaparan dihentikan, maka plutonium yang terekresi menjadi 27,9 sampai 44,3%. Implementasi data ini untuk mengetahui kemampuan depurasi plutonium pada siput macan di perairan laut Tanjung Kait antara lain kejadian pemaparan zat radionuklida plutonium dapat terdeteksi menggunakan biota laut siput macan walaupun berlangsung 1 hari, dimana pada hari ke-1, kontaminan akan tertahan sebesar 90,7 sampai dengan 98,5% atau terekresi sebesar 1,5 sampai dengan 9,3%.

Setelah 7 hari kontaminan masih tertahan sekitar 55,7 sampai dengan 72,1% atau terekresi sebesar 27,9 sampai 44,3%. Kemampuan retensi tersebut dapat digunakan untuk membuktikan kejadian pencemaran plutonium walaupun telah terhenti selama 7 hari.

Hubungan Nilai Retensi dengan Lamanya Pelepasan Kontaminan

Proses depurasi (pelepasan) dilakukan untuk melihat kemampuan eliminasi atau pelepasan ^{242}Pu di dalam tubuh siput macan. Berikut adalah perbandingan kemampuan pelepasan ^{242}Pu rerata dalam tubuh siput macan yang disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Kemampuan Pelepasan Rerata ^{242}Pu Pada siput macan yang Direpresentasikan dalam Persen Retensi

Berdasarkan Gambar 3, diperoleh persamaan garis lurus pelepasan plutonium dari rerata ketiga macam siput macan. $Y_{\text{rerata}} = -5,2786x + 103,2$ dengan nilai $R^2 = 0,9446$. Berdasarkan persamaan garis lurus di atas dapat ditentukan nilai kemiringan (*slope*) yang merupakan konstanta total eliminasi kontaminan (*ke*). Nilai *ke* rerata depurasi dari berbagai macam siput macan yang diperoleh yaitu 0,051. Nilai *ke* menunjukkan bahwa setiap bertambahnya 1 hari depurasi, maka akan menurunnya nilai retensi kontaminan plutonium rerata pada penelitian ini adalah 0,051.

Nilai R^2 pada model depurasi ^{242}Pu rerata pada siput macan ini sebesar 0,9446 (94%) dengan nilai .sig 0,000032417 sehingga kemampuan variabel bebas dalam menjelaskan varians dari variabel terikatnya dikategorikan baik dan model yang dihasilkan signifikan. Hal ini berarti pelepasan plutonium dengan lamanya waktu depurasi menunjukkan hubungan positif artinya semakin lamanya waktu depurasi, maka jumlah kontaminan plutonium akan semakin menurun.

Waktu tinggal biologis plutonium dalam tubuh siput macan dapat ditentukan dari laju pelepasan yang merupakan nilai *slope* (*ke*) dari plot antara ^{242}Pu yang tertahan dalam tubuh terhadap lama paparan (hari) (Suseno, 2011). Besarnya nilai *ke* yang diperoleh dari akuarium rerata adalah 0,051.

Waktu tinggal biologis dari siput macan pada akuarium rerata adalah 13,55 hari. Berdasarkan hasil eksperimen ini, waktu untuk siput macan melakukan proses depurasi (membersihkan diri) total dari kontaminan, diperlukan waktu selama 13,55 hari.

Rekapitulasi Parameter Biokinetik pada Siput Macan

Salah satu cara untuk menentukan kemampuan bioakumulasi adalah mengetahui nilai Bio Konsentrasi Faktor (BCF). Bio

Konsentrasi Faktor (BCF) adalah rasio konsentrasi kimia disuatu organisme air yang ditentukan dalam percobaan laboratorium terkendali di mana organisme uji yang dipaparkan bahan kimia di dalam air (UK-EPA, 2011). Menurut Reinardy *et al* (2001) jika paparan kontaminan bahan kimia ke organisme memiliki durasi (waktu) yang cukup, kesetimbangan akan terbentuk antara kontaminan di dalam jaringan tubuh organisme dan di dalam lingkungan abiotik (air). Van der Oost *et al* (2003) juga menjelaskan Bio Konsentrasi Faktor (BCF) adalah suatu rasio konsentrasi bahan kimia di dalam tubuh organisme serta di dalam air selama *steadystate* atau setimbang (tunak). Pada percobaan *uptake* ^{242}Pu oleh siput macan dilakukan selama 19 hari, dan cenderung mencapai kondisi *steadystate* pada hari ke 15. Berikut adalah parameter biokinetik dan perhitungan Bio Konsentrasi Faktor (BCF) yang disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Parameter Biokinetik dan Perhitungan Bio Konsentrasi Faktor (BCF)

Akuarium	Konsentrasi ^{242}Pu di Air (Bq/l^{-1})	<i>Ku</i>	<i>Ke</i>	BCF	$t_{1/2}=\ln(2)/ke$ (hari)
1	0,247	5,1487	0,054	96,14	12,94
2	0,247	5,2651	0,043	122,47	16,12
3	0,247	5,1245	0,057	90,66	12,26
Rerata	0,247	5,1794	0,051	101,26	13,55

Berdasarkan Tabel 3, kemampuan rerata siput macan dalam melakukan bioakumulasi radionuklida plutonium sebesar 101,26 kali dibandingkan konsentrasinya dalam air laut. Konsentrasi plutonium di lingkungan akan berpengaruh besar terhadap faktor bioakumulasi pada biota. Seperti halnya, penelitian yang dilakukan di Polandia dan di Laut Baltik, dimana nilai BCF polonium dan plutonium lebih besar dibandingkan dengan nilai BCF uranium pada biota yang sama. Hal ini disebabkan karena konsentrasi polonium dan plutonium di air lebih besar dibandingkan dengan konsentrasi uranium (Skwarzec, et al. 2012)

Mengacu pada hasil percobaan dimana nilai BCF adalah sebesar $101,26 \text{ ml.g}^{-1}$, jika konsentrasi plutonium di dalam air laut pada perairan Indonesia saat ini sebesar $4,69 \times 10^{-4} \text{ Bq/l}$ (Makmur, 2007). Hasil dari percobaan bioakumulasi siput macan adalah $4,75 \times 10^{-2} \text{ Bq/kg}$ yang dimana tidak membahayakan bagi

keselamatan publik dan termasuk dalam kategori aman apabila siput macan dikonsumsi oleh masyarakat dengan asumsi batas masukan makanan sebesar $1 \times 10^5 \text{ Bq}$ pertahun. Konsentrasi plutonium dalam bentuk $^{239/240}\text{Pu}$ di dalam air laut perairan Indonesia dan aktifitasnya pada makanan laut pada saat ini sesuai dengan regulasi lepasan radionuklida ke dalam lingkungan menurut Keputusan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor: 02/Ka-Bapeten/V-99.

KESIMPULAN

Pada proses *uptake*, konsentrasi faktor rerata plutonium pada siput macan pada hari pertama pemaparan, nilai konsentrasi faktor rerata sebesar $10,8 \pm 1,76 \text{ ml.g}^{-1}$. Nilai faktor konsentrasi tersebut terus meningkat dan cenderung mengalami *steadystate* setelah waktu 15 hari pengambilan kontaminan. Pada hari 19, nilai faktor konsentrasi sebesar $101,22 \pm 1,03 \text{ ml.g}^{-1}$. Berdasarkan data tersebut, menunjukkan bahwa siput macan mampu mengakumulasi

sebesar 101,22 kali konsentrasi plutonium di dalam air laut.

Pada proses depurasi, dilakukan tujuh hari pengambilan (*Uptake*) kontaminan sebelum dilakukan proses pelepasan (Depurasi). Setelah hari pertama pelepasan (Depurasi), persentase plutonium rerata akan tertahan (retensi) di tubuh siput macan sebesar $94,93 \pm 3,94\%$ atau tereksresi sebesar 5,07%. Setelah 7 hari pelepasan (Depurasi), masih tertahan sebesar $62,73 \pm 8,45\%$ atau tereksresi sebesar 37,27%. Kemampuan retensi tersebut dapat digunakan untuk membuktikan kejadian pencemaran plutonium walaupun telah berhenti selama 7 hari.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada semua anggota Tim radioekologi kelautan PTKMR BATAN, terutama kepada Dr. Heny Suseno atas ide dan pemikirannya. Penelitian ini dibiayai oleh DIPA PTKMR BATAN.

DAFTAR PUSTAKA

1. BPLHD DKI Jakarta, 2016. Laporan Status Lingkungan Hidup Daerah Provinsi Daerah Khusus Ibukota Jakarta Tahun 2015. Pemerintahan Provinsi DKI Jakarta. Hal 1-2. <http://bplhd.jakarta.go.id/SLHD2016/Docs/pdf/Buku%20I/Laporan%20SLHD%20Provinsi%20DKI%20Jakarta%20Tahun%202015.pdf>.
2. Budiawan. 2013. Studi Bioakumulasi Metil Merkuri pada *Perna Viridis* dan *Anadara Indica* Menggunakan Radiotracer. Jurnal Teknologi Pengelolaan Limbah Volume 16 Nomor 2 Tahun 2013. Pusat Teknologi Limbah Radioaktif-BATAN.
3. Steinhauser, G., Brandl, A., & Johnson, T.E. 2014. Comparison of the Chernobyl and Fukushima Nuclear Accidents: A Review on the Environmental Impact. *Science of the Total Environment Journal*. 470-471 (2014). P. 800-817.
4. Povinec, P. P. 2004. ^{90}Sr , ^{137}Cs and $^{239,240}\text{Pu}$ Concentration Surface Water Time Series in the Pacific and Indian Ocean. *Journal of Environmental Radioactivity* 81 (63-87).
5. Yandra, A., Suseno, H., & Safni. 2013. Bioakumulasi ^{137}Cs oleh Keong Mas (*Pomacea Canaliculata*) dengan Metode Kompartemen Tunggal. *Jurnal Teknologi Pengelolaan Limbah Volume 16 Nomor 3, Edisi Suplemen Tahun*
6. Fowler. 2013. Brief Introduction to Marine Radioecology with Emphasis on Bioaccumulation in Marine Organisms. School of Marine and Atmospheric Sciences Stony Brook University. USA.
7. Sakaguchi, A. et al. 2012. Isotopic Determination of U, Pu and Cs in Environmental Waters Following the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident. *Geochem. J.* 46, 355-360 (2012).
8. Umbara, H & Suseno, H. 2003. Simulasi Bioakumulasi Pb dan Cd pada *Anadara Inflata* dan *Babylonia Palida*. Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir. P3TM. Yogyakarta. 9 Juli 2003.
9. Suseno, H. 2011. Bioakumulasi Merkuri dan Metil Merkuri oleh *Oreochromis mossambicus* Menggunakan Aplikasi Perunut Radioaktif: Pengaruh Konsentrasi, Salinitas, Partikulat, Ukuran Ikan dan Kontribusi Jalur Pakan (Disertasi). Universitas Indonesia. Depok.
10. Makmur, M., 2007. Penentuan Nilai Koefisien Distribusi (Kd) $^{239,240}\text{Pu}$ pada Perairan Laut Bangka Selatan. PTLR-BATAN. Serpong.
11. Povinec, P. P. & Livingstone, H. 2000. Anthropogenic Marine Radioactivity. *Ocean & Coastal Management* 43. 689-712. Elsevier.
12. Hirose & Aoyama. 2003. Analysis of ^{137}Cs and $^{239,240}\text{Pu}$ Concentrations in Surface Waters of the Pacific Ocean. *Deep-Sea Research II* 50, 2675-2700.
13. Giffari, A. 2011. Karakteristik Asam Lemak Daging Keong Macan (*Babylonia Spirata*), Kerang Tahu (*Meretrix Meretrix*), dan Kerang Salju (*Pholas Dactylus*) [Skripsi]. Bogor: Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Institut Pertanian Bogor.
14. Nitisupardjo & Mustofa. 1998. Pencemaran Hg, Cd dan Pb Pada Ikan Belanak (*Mugil sp*), Air dan Sedimen di Perairan Pantai Pelabuhan Tanjung Emas dan Muara Sungai Babon Kotanadya Dati II Semarang Jawa Tengah. Program Pasca Sarjana, Universitas Gajah Mada. Yogyakarta. 126 hlm.
15. Nakahara, M. & Nakamura, R. 2004. Uptake, Retention and Organ/Tissue Distribution of ^{137}Cs by Japanese Catfish (*Silurus Asotus Linnaeus*).

- Journal of Environmental Radioactivity. 77: 191–204.
16. Campbell, 2002. Predicting Metal Bioavailability Applicability of Biotic Ligan Model, Ciesm Workshop Monographs 19, Metal and Radionuclide Bioaccumulation in Marine Organisme, Monaco.
 17. UK-EPA. 2011. Estimation of Fish Bioconcentration Factor (BCF) from Depuration Data. UK Environment Protection Agency, Horizon House, Deanery Road, Bristol.
 18. Reinardy, H.C. Teysse, J.L. Jeffree, R.A. Copplestone, D. Henry, T.B. & Jha, A. 2011. Uptake, Depuration, and Radiation Dose Estimation In Zebrafish Exposed To radionuclides Via Aqueous Or Dietary Routes. Science of the Total Environment, 409: 3771–3779.
 19. Van der Oost, R. Beyer, J. & Vermeulen, N. P. E. 2003. Fish Bioaccumulation and Biomarkers in Environmental Risk assessment: A Review. Environmental Toxicology and Pharmacology, 13: 57-149.
 20. Skwarzec, B., Struminska-Parulska, D.I., Boryto, A., & Kabat, K. 2012. Polonium, Uranium and Plutonium Radionuclides in Aquatic and Land Ecosystem of Poland. Journal of Environmental Science and Health. Part A. Volume 47. Issue 3. Tahun 2012.

PENGARUH KOEFISIEN DISTRIBUSI ^{137}Cs PADA KESELAMATAN CALON TAPAK FASILITAS DISPOSAL LIMBAH RADIOAKTIF

Budi SETIAWAN, Dadang SUGANDA

Pusat Teknologi Limbah Radioaktif-Badan Tenaga Nuklir Nasional
Kawasan Puspiptek Serpong Gedung 50, Tangerang Selatan, Banten 15310
E-mail: bravo@batan.go.id

ABSTRAK

PENGARUH KOEFISIEN DISTRIBUSI ^{137}Cs PADA KESELAMATAN CALON TAPAK FASILITAS DISPOSAL LIMBAH RADIOAKTIF. Nilai koefisien distribusi (Kd) adalah besaran yang mewakili proses kimia-fisika yang terjadi saat radionuklida kontak dengan bahan alam. Besarnya nilai Kd mengindikasikan besarnya *loading factor* bahan alam terhadap adanya radionuklida, sehingga akan meminimalkan besarnya radionuklida dapat terdispersi ke lingkungan. Bahan alam seperti tanah lokasi digunakan sebagai sistem penghalang alami pada fasilitas disposal limbah radioaktif. Besarnya nilai Kd dari tanah lokasi dapat menyebabkan terhambatnya dispersi radionuklida ke lingkungan, dan akan menentukan unjuk kerja sistem penghalang alami yang menunjukkan tingkat keselamatan calon tapak fasilitas disposal limbah radioaktif. Perangkat lunak PRESTO digunakan bertujuan untuk mempelajari keselamatan calon tapak fasilitas disposal limbah radioaktif dengan melihat jalur luaran ^{137}Cs ke lingkungan. Hasilnya menunjukkan bahwa nilai Kd ^{137}Cs pada tanah lokasi memberikan pengaruh yang besar pada tingkat keselamatan dari suatu fasilitas disposal limbah radioaktif.

Kata Kunci : Kd, tanah lokasi, ^{137}Cs , fasilitas disposal, keselamatan lingkungan.

ABSTRACT

EFFECTS OF DISTRIBUTION COEFFICIENT OF ^{137}Cs ON THE SAFETY OF SITE CANDIDATE OF RADWASTE DISPOSAL FACILITY. Distribution coefficient value is a representative number of chemical-physical processes in a contact of radionuclides with natural materials. The number of Kd values indicated the loading factor of natural materials to the existence of radionuclide, and it would minimize the number of radionuclides dispersed into the environment. Natural material such as site's soil is used as a natural barrier system on the radioactive waste disposal facility. The high number of Kd value of site's soil to radionuclide may retard the dispersion of radionuclides into the environment, and it will determine the performance of natural barrier system to indicate the level of safety of the candidate site of radioactive waste disposal facility. PRESTO software was used to study the safety of candidate site of disposal facility by observing ^{137}Cs pathways to environment. Results showed that Kd value of ^{137}Cs to site soil has been significantly effects on the safety level of a radioactive waste disposal facility.

Keywords : Kd, site's soil, ^{137}Cs , disposal facility, environment safety

PENDAHULUAN

Radionuklida seperti ^{137}Cs telah mendominasi inventori limbah radioaktif (LRA) tingkat rendah-sedang, dengan waktu paro ($t_{1/2}$) yang panjang ~30 tahun. Selain radionuklida itu radionuklida ini mempunyai tingkat kelarutan di media air/air tanah yang tinggi, serta mempunyai kesamaan sifat kimia dengan ion K sehingga sangat mudah berinteraksi dengan organisme yang ada di akuatik maupun di teresterial [1-5]. Apabila masuk ke dalam tubuh manusia melalui rantai makanan, radionuklida ini akan berkumpul pada jaringan lunak seperti otot [4] yang dapat menyebabkan peningkatan resiko kanker bagi yang terkena [6,7]. Sehingga keberadaan ^{137}Cs pada suatu fasilitas disposal LRA perlu dipelajari tingkat serapnya pada bahan alami seperti tanah

lokasi atau tanah calon tapak fasilitas disposal LRA. Dengan mempelajari serapan ^{137}Cs pada bahan alam akan dapat dipelajari cara mengontrol dispersi ^{137}Cs ke lingkungan.

Besarnya volume limbah untuk tingkat rendah-sedang yang dihasilkan menyebabkan fasilitas disposal jenis *near surface disposal* (NSD) lebih diprioritaskan untuk lebih diperhatikan. Dalam sistem disposal NSD, bahan alam dimanfaatkan sebagai sistem penghalang berlapis (*multibarrier system*) yang terdiri dari sistem penghalang alami dan sistem penghalang buatan dari fasilitas disposal LRA [8]. Sistem penghalang ini dapat tersusun dari tanah calon lokasi, bahan alam lain yang mempunyai kemampuan serap yang baik seperti bentonit, kaolin atau bahan alam yang mampu meluluskan

air dengan baik seperti pasir kuarsa [9-12]. Bahan-bahan alam seperti inilah yang sering dipakai pada fasilitas disposal LRA jenis NSD di dunia.

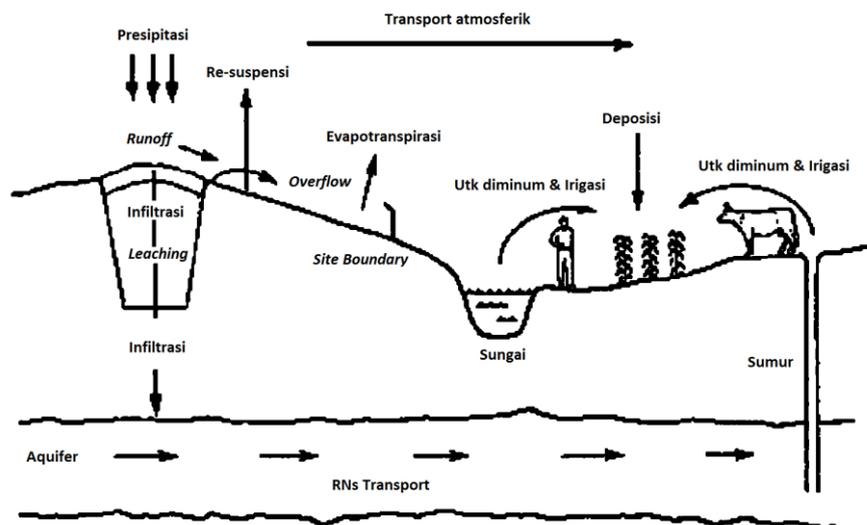
Bahan-bahan alam tersebut digunakan untuk mengisolasi radionuklida seperti ^{137}Cs yang ada pada paket limbah agar dapat dikontrol, sehingga dapat menghambat tersebarnya ^{137}Cs ke lingkungan. Terbatasnya sebaran radionuklida ke lingkungan menunjukkan kemampuan unjuk kerja dari sistem disposal LRA. Untuk mengetahui unjuk kerja keselamatan fasilitas disposal maka perlu dilakukan penyelidikan kemampuan isolasi dari sistem disposal tersebut, salah satunya adalah menentukan kemampuan serap radionuklida oleh tanah lokasi dimana disposal LRA tersebut direncanakan [13]. Indikator untuk mengetahui kemampuan serap radionuklida ke bermacam bahan alam dapat diketahui dari nilai koefisien distribusi/(Kd)-nya, dimana nilai Kd merupakan ratio antara banyaknya radionuklida yang terserap di bahan alam dibandingkan dengan banyaknya radionuklida yang tersisa di larutan [14].

Nilai Kd yang tinggi pada bahan alam seperti tanah lokasi akan menyebabkan banyak ^{137}Cs terserap pada tanah lokasi, ^{137}Cs akan banyak terikat pada tanah lokasi dan sedikit lepas ke lingkungan sehingga lepasnya ^{137}Cs ke lingkungan dapat terkontrol dengan baik demikian pula bila sebaliknya. Nilai Kd yang tinggi juga akan mengindikasikan *loading factor* yang tinggi dan tingkat keselamatan yang tinggi, sehingga dengan tingginya Kd pada tanah calon lokasi fasilitas disposal akan membuat sistem disposal yang direncanakan menjadi lebih selamat dan ekonomis. Sebaliknya bila nilai Kd rendah yang diperoleh untuk tanah lokasi, maka fasilitas disposal tersebut perlu dikompensasi dengan sistem penghalang buatan dengan kemampuan kontrol air tanah yang lebih baik agar tingkat keselamatannya tetap tinggi.

^{137}Cs berpotensi sebagai sumber paparan eksterna maupun interna terhadap pekerja dan lingkungan biosfer. Baik pada saat fasilitas disposal tersebut beroperasi maupun

pada tahap pasca penutupan. Pada saat beroperasi pekerja radiasi dapat melakukan kontak dengan paket limbah secara eksternal, atau secara internal melalui jalur injeksi dan inhalasi dari debu udara yang terkontaminasi. Sedangkan cemaran ^{137}Cs ke lingkungan dapat melalui media air tanah. Kemudian melalui jalur rantai makanan ^{137}Cs dapat sampai ke manusia yang ada di sekitar fasilitas disposal LRA. Besarnya nilai ^{137}Cs yang terdispersi melalui jalur paparan akan mengindikasikan kondisi keselamatan di lingkungan sekitar fasilitas disposal LRA. Semakin besar konsentrasi ^{137}Cs dapat ditemukan pada jalur luaran (*pathway*), maka kondisi keselamatan yang diperoleh menjadi rendah. Hal ini menunjukkan bahwa tanah lokasi tersebut tidak mampu mengontrol dispersi ^{137}Cs ke lingkungan, demikian bila ditemukan hal yang sebaliknya.

Prediction on Radiation Exposures from Shallow Trench Operations (PRESTO) adalah kode computer yang digunakan untuk mengkaji resiko yang berkaitan dengan disposal limbah radioaktif jenis tanah dangkal, *shallow land disposal* atau NSD. Perangkat lunak ini dikembangkan oleh *US Environmental Protection Agency* (US-EPA), yang digunakan untuk memperkirakan kemungkinan pengaruhnya terhadap kesehatan yang disebabkan oleh keberadaan suatu fasilitas NSD. Penumpukan dan distribusi radionuklida di lingkungan merupakan suatu proses yang rumit karena adanya pengaruh pelepasan, peluruhan waktu paro dan transport fisik dari radionuklida yang mencapai suatu konsentrasi tertentu di lingkungan. Selain itu juga digunakan untuk memperkirakan jalur-jalur lepasan radionuklida yang potensial untuk mencapai konsentrasi maksimum pada titik/lokasi tertentu di lingkungan [15-17]. Gambar 1 adalah jalur lepasan radionuklida dari fasilitas disposal ke lingkungan yang digunakan pada model PRESTO [15]. Penggunaan perangkat lunak PRESTO pada studi ini bertujuan untuk mempelajari keselamatan calon tapak fasilitas disposal limbah radioaktif dengan melihat jalur luaran ^{137}Cs ke lingkungan.



Gambar 1. Jalur lepasan radionuklida pada lingkungan yang digunakan pada model PRESTO

Pada makalah ini akan dipelajari pengaruh nilai Kd terhadap dispersi ^{137}Cs ke lingkungan melalui jalur injeksi, inhalasi, *air immersion* dan permukaan tanah, dengan menggunakan perangkat lunak keselamatan PRESTO yang mengacu pada metode ISAM [18]. Sebagai masukan akan digunakan 2 nilai Kd yang berbeda (tinggi, 20 dan rendah, 4). Hasilnya akan didiskusikan sebagai indikator keselamatan di lingkungan di sekitar fasilitas disposal LRA.

METODOLOGI

Penentuan tingkat keselamatan fasilitas disposal LRA dilakukan melalui studi pustaka dengan menggunakan beberapa besaran asumsi dan pengkajian keselamatan fasilitas disposal LRA menggunakan perangkat lunak PRESTO. Sumber ^{137}Cs diidentifikasi sebagai sumber radioaktif pada paket LRA.

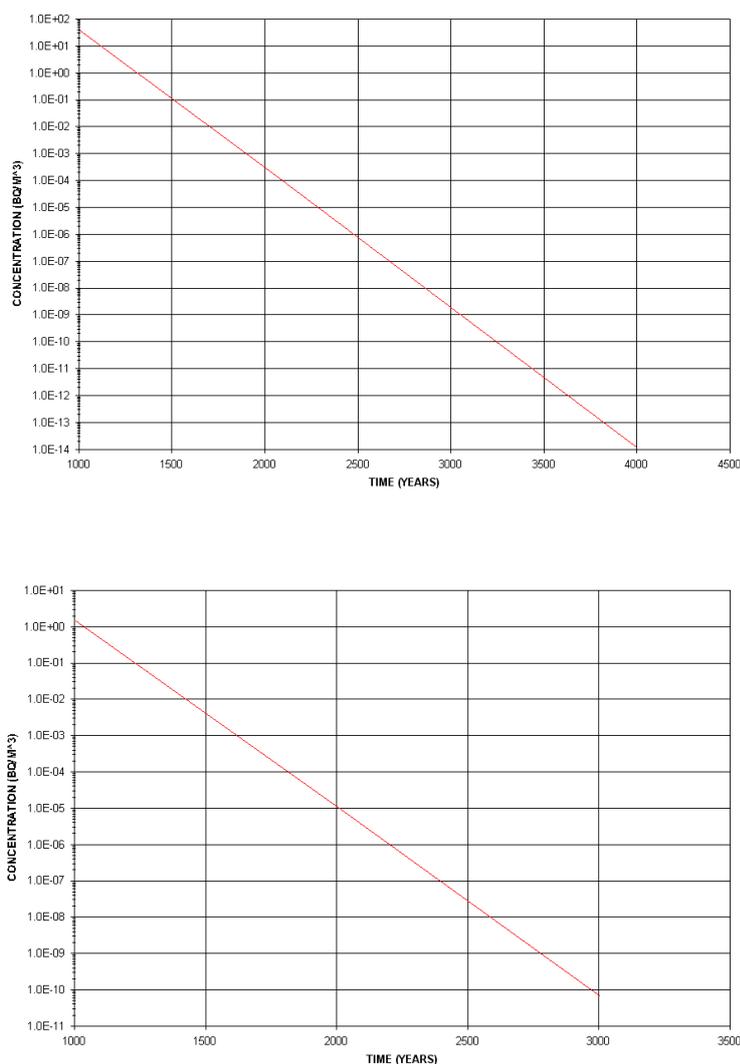
Parameter seperti pada Tabel 1 di Lampiran telah digunakan sebagai masukan pada perangkat lunak PRESTO [12,18]. Besaran asumsi digunakan sebagai masukan dengan pendekatan yang disesuaikan dengan perkiraan limbah, disain fasilitas, kondisi tapak dan lingkungan disekitar fasilitas disposal LRA yang direncanakan [15]. Hasil luaran sebagai indikator tingkat keselamatan adalah data konsentrasi ^{137}Cs dalam air sumur yang berjarak 30 m dari fasilitas disposal, dosis individu berdasarkan radionuklida dan pathway serta resiko insiden individu berdasarkan radionuklida dan pathway.

Data dosis tahunan secara total juga akan ditunjukkan pada hasil kajian keselamatan dengan perangkat lunak PRESTO. Perbandingan kecenderungan terlindungnya ^{137}Cs ke sumur hipotesis dari kondisi 2 nilai Kd yang berbeda kemudian hasilnya dibandingkan dan dianalisis sehingga akan terlihat adanya perbedaan tingkat keselamatan dari adanya 2 nilai Kd yang berbeda tersebut.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Inventori ^{137}Cs yang terkumpul dari LRA aktivitas rendah dari suatu pembangkit listrik tenaga nuklir dapat mencapai sekitar $5,3 \times 10^{14}$ Bq [19]. Dengan menggunakan perangkat lunak PRESTO 4.2 dilakukan perhitungan kondisi lingkungan untuk sumur pada jarak hipotesis 30 m dari fasilitas disposal LRA, dengan asumsi bahwa jarak tersebut adalah jarak yang paling dimungkinkan untuk dijangkau oleh ^{137}Cs saat terdispersi di lingkungan sehingga analisis keselamatan fasilitas disposal dapat dilakukan.

Hasil yang diperoleh dari luaran PRESTO disajikan pada Gambar 2, dimana konsentrasi ^{137}Cs yang terakumulasi di sumur hipotesis adalah sekitar 30 dan $0,5 \text{ Bq/m}^3$ masing-masing untuk nilai Kd 4 dan 20. Nilai konsentrasi ^{137}Cs pada sumur hipotesis ini akan terus menurun berdasarkan waktu penyimpanannya, sampai mencapai nilai yang minimum.

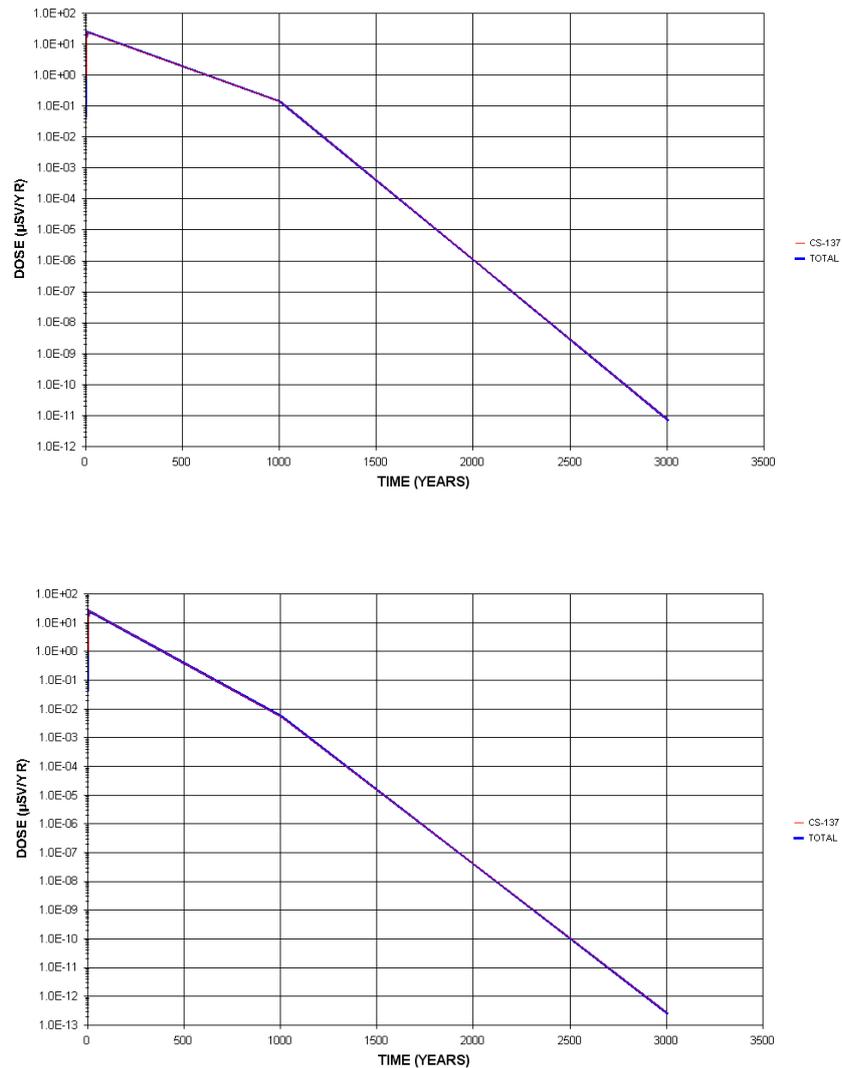


Gambar 2. Konsentrasi ¹³⁷Cs pada air sumur hipotesis,
 (atas) Kd = 4, (bawah) Kd = 20

Seperti disinggung pada pendahuluan bahwa besarnya nilai Kd ¹³⁷Cs oleh tanah lokasi dapat menyebabkan ¹³⁷Cs akan lebih banyak terakomodasi dan lebih kuat terikat pada tanah lokasi. *Loading factor* yang besar dari tanah lokasi terhadap ¹³⁷Cs (untuk nilai Kd yang besar) menyebabkan ¹³⁷Cs yang terdispersi ke lingkungan menjadi lebih sedikit. Keterangan ini sesuai dengan hasil yang ditunjukkan pada Gambar 2, dimana pada nilai Kd yang kecil telah memberikan nilai konsentrasi ¹³⁷Cs yang lebih besar pada sumur hipotesis.

Nilai baku tingkat radioaktivitas dalam air tanah serta batas masukan tahunan telah ditetapkan oleh Perka BAPETEN [20,21], dimana hal tersebut sangat tergantung dari sifat

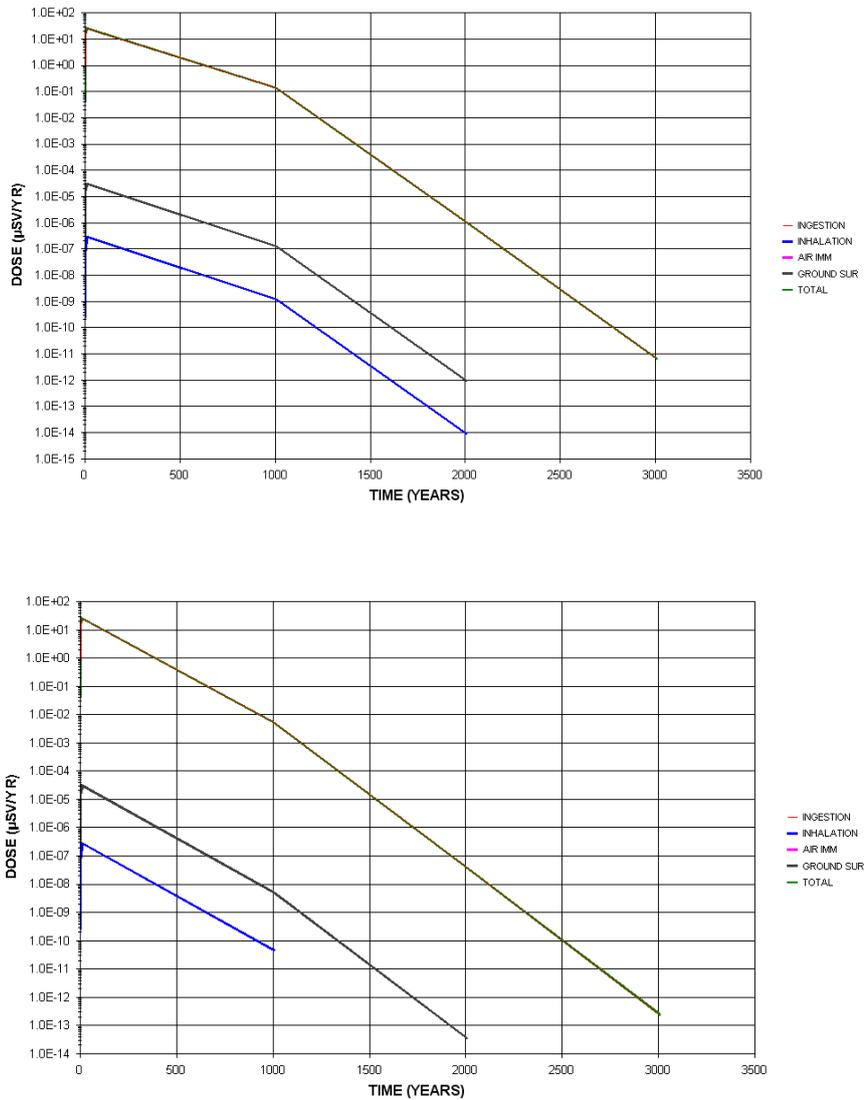
dan jenis radionuklida. Di lingkungan air tanah, pada prakteknya sangat sulit untuk dapat membedakan sifat radionuklida yang terlarut dan tak terlarut karena hasil pengukuran radionuklida merupakan hasil akumulasi radionuklida yang berasal dari bermacam sumber kontaminan yang ada di lingkungan. Nilai baku ini juga mempertimbangkan nilai batas masukan ke manusia sebagai batas pengaruh radiologik pada manusia, sehingga nilai batas tersebut akan selaras dengan kadar/konsentrasi tertinggi yang diijinkan di air tanah/lingkungan. Nilai batas konsentrasi ¹³⁷Cs yang diijinkan atau maksimal boleh ada di air tanah adalah $2,5 \times 10^2$ Bq/m³, sehingga nilai-nilai yang diperoleh dari kajian ini masih jauh lebih rendah dari nilai batas yang diijinkan.



Gambar 3.Dosis yang diterima seseorang dari paparan ^{137}Cs ,
(atas) $K_d = 4$, (bawah) $K_d = 20$

Gambar 3 menunjukkan besar dosis yang diterima seseorang karena adanya ^{137}Cs pada sumur hipotesis. Berdasarkan hasil dari PRESTO di awal tahun ke-0, individu akan menerima dosis yang sama besarnya (sekitar 20 $\mu\text{Sv}/\text{th}$), tetapi dengan berjalannya waktu dosis yang diterima menjadi berbeda. Untuk fasilitas disposal yang mempunyai nilai K_d lebih kecil akan menerima dosis yang lebih besar. Misalnya pada waktu penyimpanan 1000 tahun, nilai dosis

untuk nilai K_d yang kecil telah memberikan nilai dosis sekitar 0,1 $\mu\text{Sv}/\text{th}$ dibandingkan dengan nilai dosis yang hanya 0,006 $\mu\text{Sv}/\text{th}$ untuk nilai K_d yang lebih besar. Dosis ini diperoleh dari akumulasi nilai dosis yang berasal dari seluruh jalur paparan yang mengarah ke sumur hipotesis. Ambang nilai dosis untuk masyarakat umum adalah 1 mSv/th [22-26], yang masih jauh diatas dari nilai dosis individu yang diterima oleh individu.



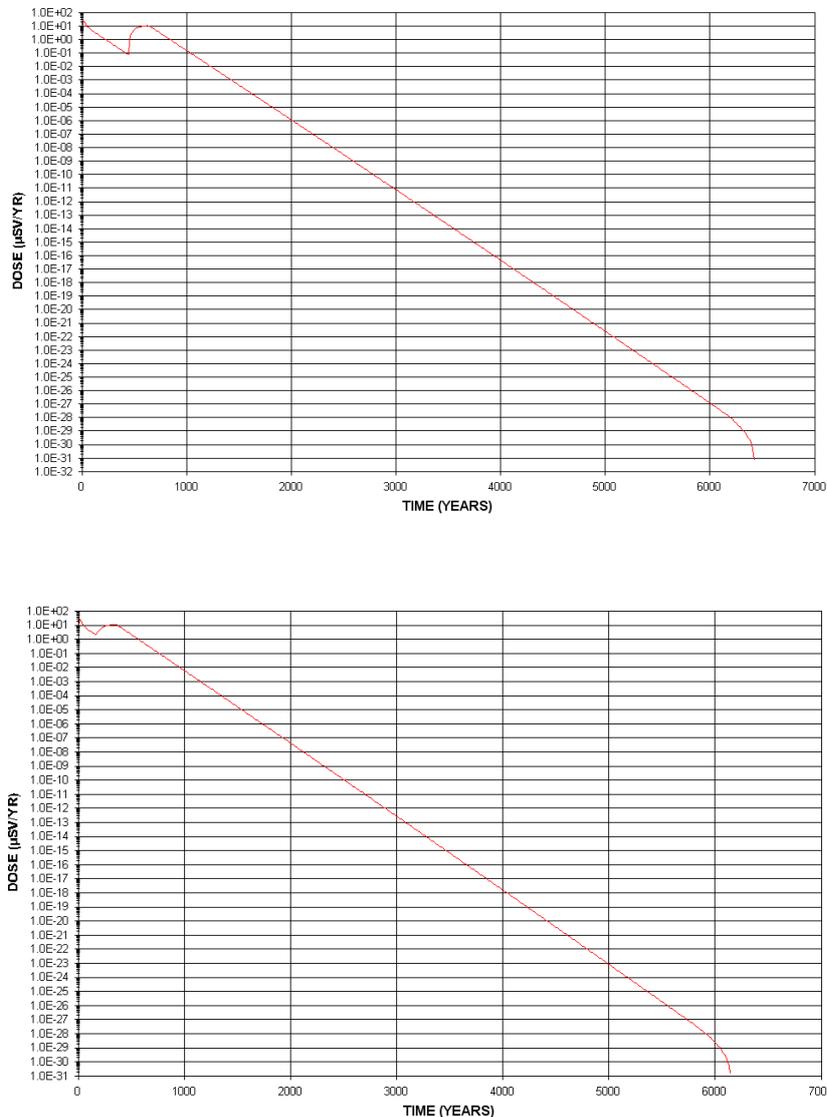
Gambar 4. Dosis yang diterima seseorang berdasarkan jalur luarannya, (atas) Kd = 4, (bawah) Kd = 20

Berdasarkan jalur luarannya dosis yang diterima pada sumur hipotesis ditunjukkan pada Gambar 4. Jalur injesti terlihat memberikan kontribusi yang sangat besar dibandingkan dengan 2 jalur lainnya yaitu permukaan dan inhalasi. Hal ini berarti *release* ¹³⁷Cs melalui air tanah sangat penting untuk diperhatikan pada pengkajian keselamatan ini dibandingkan dengan jalur luaran lainnya. Nilai dosis total terlihat berimpit rapat dengan nilai dosis yang berasal dari jalur luaran injesti, yang berarti nilai dosis yang berasal dari jalur luaran permukaan dan inhalasi sangat berbeda jauh dibandingkan yang berasal dari jalur injesti.

Gambar 5 memperlihatkan bahwa ¹³⁷Cs yang terdispersi ke air sumur telah memberikan besaran yang sama untuk kedua nilai Kd, sekitar 100 µSv/th (yang diinformasikan dengan dosis tahunan total) pada tahun ke 0. Dosis total ini kemudian menurun sampai sekitar tahun ke-440 dan 160 penyimpanan. Dosis tersebut mengalami peningkatan lagi karena adanya akumulasi ¹³⁷Cs di lingkungan sampai tahun ke-600 dan 320, dengan maksimum dosis tahunan total ~ 10 mSv/th. masing-masing untuk nilai Kd 4 dan 20 mL/g. Setelah masa itu dosis tahunan total akan terus menurun.

Perbedaan waktu untuk mencapai nilai dosis tahunan total yang maksimum terlihat jelas dari kedua nilai Kd. Pada nilai Kd yang lebih kecil, waktu untuk mengakumulasi ^{137}Cs di sumur hipotesis terlihat lebih lambat

dibandingkan dengan dengan nilai Kd yang besar sehingga waktu yang diperlukan untuk dispersi ^{137}Cs ke sumur hipotesis lebih lama dibandingkan dengan nilai Kd yang lebih besar.



Gambar 5. Dosis tahunan total dari ^{137}Cs yang terakumulasi pada sumur, (atas) Kd = 4, (bawah) Kd = 20

Hal ini menunjukkan bahwa pada nilai Kd yang besar, ^{137}Cs akan terikat lebih kuat pada tanah calon lokasi dibandingkan dengan nilai Kd yang kecil. Hal tersebut dibuktikan dengan kecilnya nilai konsentrasi ^{137}Cs di sumur hipotesis, kecilnya dosis yang diterima oleh individu dan kecilnya dosis total tahunan. Atau dengan kata lain adalah banyaknya ^{137}Cs yang terdispersi ke lingkungan lebih sedikit

dibandingkan pada lokasi yang mempunyai nilai Kd yang kecil. Hasil yang diperoleh ini bila dibandingkan dengan nilai dosis tertinggi yang ada pada Peraturan BAPETEN menunjukkan bahwa batas untuk pelepasan radionuklida ^{137}Cs jauh lebih kecil, dimana pada peraturan tersebut nilai dosisnya berkisar antara 20-50 mSv/th untuk pekerja radiasi dan 1 mSv/th untuk masyarakat umum [20-26].

KESIMPULAN

Hasil yang diperoleh dari analisis kajian ini menunjukkan bahwa nilai Kd sangat berpengaruh pada keselamatan calon tapak fasilitas disposal limbah radioaktif. Semakin besar nilai Kd yang dimiliki oleh suatu lokasi, semakin aman lokasi tersebut terhadap kemungkinan terjadinya dispersi radionuklida ke lingkungan yang ditandai dengan besarnya konsentrasi ^{137}Cs dan dosis yang diterima pada sumur hipotesis. Semakin sedikitnya dispersi radionuklida ke lingkungan berarti semakin selamat lokasi tersebut dari adanya cemaran radionuklida.

DAFTAR PUSTAKA

1. Westinghouse, *Generic Design Assessment: Summary of Disposability Assessment for Wastes and Spent Fuel Arising from Operation of the Westinghouse AP1000*, USA, 2014.
2. Westinghouse, *AP1000 Nuclear Power Plant*, USA, 2011.
3. H. Persson, *Migration of Radiocaesium in Six Swedish Pasture Soils After The Chernobyl Accident*. Uppsala: Sveriges Lantbruksuniversitet; 2008.
4. C. Poinssot, B. Baeyens, M.H. Bradbury, Experimental and Modeling Studies of Cesium Sorption on Illit. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1999; 6: 3217-3227.
5. A. Cremers, A. Elsen, P. De Preter and A. Maes. Quantitative Analysis of Radiocaesium Retention in Soils. *Nature*. 1998; 335: 247-249.
6. Center for Disease Control and Prevention, *Cesium-137*. Dept. Health and Human Service, USA, 2004
7. Anonim, *Human Health Fact Sheet-Cesium*. ANL, 2001
8. Sasaki, T., *Safety Design and Evaluation Methodology of Tunnel Repository for Low Level Radwaste Disposal in Japan*. JNFL, 2007.
9. Setiawan, B., Sorption Characterization of Radiocesium by Host Rock of Candidate Site as Reliability Indication of Radwaste Disposal Site, Proc. 4th Environment Technology and Management Conference-ITB. Nov 3-4. 2011; Bandung.
10. Setiawan, B., Sriwahyuni, H., Ekaningrum, NEE., Sumantry, T., ^{137}Cs Sorption into Bentonite from Cidadap-Tasikmalaya as Buffer Material for Disposal Demonstration Plant Facility at Serpong. AIP Conf. Proc. 1589, doi: 10.1063/1.4868816. 2014; Bandung
11. Setiawan, B., Mayasari, E., Meidhika, S., Evaluation of Radiocesium Sorption in Some Materials as Safety Barrier System of Radioactive Waste Disposal Demonstration Facility. *Procedia Chemistry-Elsevier*. 2015; 16: 445-450.
12. Setiawan, B., Karakterisasi Permeabilitas dan Sorpsi-Desorpsi Bentonit Sebagai Bahan Penyangga (*buffer material*). Prosid. Presentasi Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir II-PEBN-BATAN. 1996; Jakarta.
13. IAEA, *Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities*, Vol.1, IAEA-Vienna, 2004.
14. Cornell, RM., Adsorption Behaviour of Cesium on MARL, *Clay Minerals* 27, 1992, 363-371
15. Hung, CY., *User's Guide for PRESTO-EPA-CPG/POP Operation System, Ver.4.2*, US-EPA, Washington DC, 2000
16. Uslu, I., Fields, DE., Yalcintas, MG., *PRESTO-II Computer Code for Safety Assessment on Shallow Land Disposal of Low-Level Wastes*, contract No. DE-ACOS-840821400, the Office of Health and Environmental Research, U.S. Department of Energy, USA, 1987.
17. Fields, DE., Emerson, CJ., Chester, RO., *PRESTO-II: A Low-Level Waste Environmental Transport and Risk Assessment Code*, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee 37831, USA (1986).
18. IAEA, *Scenario Generation and Justification for the Safety Assessment of Near Surface Radioactive Waste Disposal System*, ISAM Scenario Generation and Justification Working Group Document, Ver. 1.1, IAEA-Vienna, 2000
19. Chapman, NA., McKinley, IG., *The Geological Disposal of Nuclear Waste*, John Wiley & Sons, Chichester, 1987.
20. BAPETEN no.02/Ka-BAPETEN/V-99 tentang *Nilai Baku Tingkat Radioaktivitas di Lingkungan*, Jakarta, 1999.
21. BAPETEN, Peraturan Kepala BAPETEN No. 7 Tahun 2013 tentang *Nilai Batas Radioaktivitas di Lingkungan*, Jakarta, 2013

22. BAPETEN, Peraturan Kepala BAPETEN No. 4 Tahun 2013 tentang *Proteksi dan Keselamatan Radiasi dalam Pemanfaatan Tenaga Nuklir*, Jakarta, 2013
23. BAPETEN, Peraturan Kepala BAPETEN No. 33 Tahun 2007 tentang *Keselamatan Radiasi Pencion dan Keamanan Sumber Radioaktif*, Jakarta, 2007
24. Haditjahyono, H., *Proteksi Radiasi dalam Pekerjaan*, Pusdiklat-BATAN, Jakarta 2005
25. IAEA, *Occupational Radiation Protection*, RS-G-1.1, IAEA-Vienna, 1999
26. IAEA, *Implications for Occupational Radiation Protection of the New Dose Limit for the Lens of the Eye*, TECDOC 1731, IAEA-Vienna, 2013

Lampiran

Tabel 1.Data Tapak Untuk Pengkajian Keselamatan Fasilitas Disposal Dengan Perangkat Lunak PRESTO

No.	Aspek	Sub-aspek	Parameter	Satuan
1.	Karakteristik Tapak	Hidrologi	1. Curah hujan tahunan total	2,9 m
			2. Laju aliran sungai tahunan	$4,73 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{th}$
			3. Jarak ke sumur terdekat	30 m
			4. Jarak antara sisi tapak dan saluran	10 m
			5. Faktor curah hujan	250 R/th
		Erosi	6. Faktor erodibilitas tanah	0,23 ton/are
			7. Faktor pengelolaan tanaman	0,3
			8. Faktor penerapan pengendalian erosi	0,3
			9. Faktor ratio pengiriman sedimen	1,0
			10. Faktor kecuraman dari panjang lereng	0,27
			11. Faktor kejenuhan residual	0,17
			12. Factor of total annual precipitation for infiltration calculation	0
			13. Fraksi runoff curah hujan pada lapisan permukaan tanah	0,005
			14. Friksi runoff curah hujan pada lapisan tanah bagian bawah	0,1
			15. Active depth of soil in surface-contamina ted region	0,1
			16. Width of the contaminated site measured perpendicular to groundwater flow	100 m
			17. Panjang situs terkontaminasi yg sejajar dgn aliran air tanah	30 m

2.	Penutup & limbah	Penutup	18. Ketebalan	1
			19. Densitas	2,4 g/cm ³
			20. Porositas	0,3
			21. Permeabilitas	0,03 m/jam
			22. Kemiringan rata2 lereng	0,37 m/m
			23. Panjang lereng rata2	34,5 m
			24. <i>Pellicular water deficit</i>	0,01 m
			25. <i>Gravity water deficit</i>	3,1 m
		Komponen porositas	26. <i>Pellicular water</i>	0,47
			27. <i>Gravity water</i>	0,01
		Eq. upward limbah	28. Difusivitas	8 x 10 ⁻⁵ m/jam
			29. Konduktivitas hidrolis	9 x 10 ⁻⁵ m/s
			30. Ketebalan	6 m
			31. Densitas	2,4 g/cm ³
			32. Porositas	0,3
			33. Permeabilitas	0,3 m/jam
		Fraksi lepasan	34. <i>Absorbing waste</i>	10 ⁻¹
35. <i>Activated metals</i>	10-1			
36. <i>Solidified waste</i>	10-1			
37. <i>Containerized fraction</i>	0			
3.	Zona Vertikal dan Akuifer	Zona vertikal	38. Ketebalan	2 m
			39. Densitas	2,6 g/cm ³
			40. Porositas	0,3
			41. Permeabilitas	3 x10 ⁻⁴ m/jam
		Akuifer	42. Ketebalan	25 m
			43. Densitas	2,6 g/cm ³
			44. Porositas	0,3
			45. Permeabilitas	0,3 m/jam
			46. Fraksi kejenuhan air	1
			47. Kecepatan air tanah	26,3 m/th
			48. Sudut dispersi	1 radian
			49. <i>Allow aquifer to stream flow</i>	30 m
			4.	Atmosfer
51. Kecepatan deposisi	0,01 m/s			
52. Kec. endap secara gravitasi	0,01 m/s			
53. <i>Onsite dust loading from mechanical disturbance</i>	50 g/m ³			
54. <i>Fraction of time the wind blows in direction of interest</i>	0,5			
55. <i>Annual av. windspeed in direction of interest</i>				
56. <i>Resuspension equation parameter</i>	1) 1 x 10 ⁻⁶ 2) -0,15 3) 1 x 10 ⁻¹¹			
57. <i>Stability category indicator</i>	D			
58. <i>Pasquill-Gifford atmospheric stability class formation</i>	1			
59. <i>Height of the inversion layer</i>	2 m			
60. <i>Hosker's roughness parameter</i>	0,01 m			
61. <i>Atmospheric transport parameter</i>	5,186 x 10 ⁻⁸			

5.	<i>Basement</i>		62. Fraksi emanasi Rn-222 untuk tanah tercemar	0,3
			63. Kedalaman <i>basement</i> bawah permukaan	2 m
			64. Ketebalan beton lantai <i>basement</i>	0,2 m
			65. Porositas beton lantai	0,18
			66. Panjang tepi <i>basement</i>	40 m
			67. <i>Negative indoor house pressure</i>	2,4 Pa
			68. <i>Perimeter shrinkage crack width</i>	0,001 m
			69. Laju ventilasi <i>basement</i>	2,78 x 10 ⁻⁴ change/s
			70. Luas lantai <i>basement</i>	900 m ²
			71. <i>Basement occupancy fraction</i>	0,6
			72. <i>Outdoor, onsite occupancy fraction</i>	0,2
6.	Tanaman & Binatang	produktivitas Pertanian	73. Rumput	0,5 kg/m
			74. Vegetasi lain	0,5 kg/m
		Konsumsi air Harian	75. Sapi perah	30 L/hari
			76. Kambing perah	4 L/hari
			77. <i>Beef cattle</i>	25 L/hari
		Waktu antara Panen & konsumsi	78. Rumput	6 jam
			79. <i>Stored feed</i>	720 jam
			80. Dedaunan	24 jam
			81. Buah/biji2an	720 jam
		Waktu Pemaparan Dlm udara tercemar	82. Rumput	1401,6 jam
			83. Hasil panen	1410,6 jam
		Konsumsi makanan	84. Kambing perah	4 kg/hari
			85. <i>Beef cattle</i>	30 kg/hari
			86. <i>Transport time from animal feed to human receptor</i>	48 jam
			87. <i>Time from animal slaughter to human consumption</i>	480 jam
			88. <i>Weathering removal decay constant</i>	0,0021/jam
			89. <i>C-14 fractional equilibrium value</i>	1
			90. Kelembaman absolut udara	(81,5%) g/m ³
			91. Kedalaman akar	1 m
			92. Laju irigasi	0,015 L/m-jam
93. Fraksi infiltrasi dan presipitasi	0,5			
94. <i>Fraction of year that crops are irrigated</i>	0,5			
95. <i>Fraction of yera animals graze on the pasture grass</i>	0,25			
96. <i>Fraction of animal's daily feed that is fresh grass</i>	0,5			

7.	<i>Human uptake</i>		97. <i>Human uptake</i> terhadap sayuran	73 kg/th
			98. <i>Human uptake</i> terhadap hasil panen	100 kg/th
			99. <i>Human uptake</i> terhadap susu sapi	0
			100. <i>Human uptake</i> terhadap susu kambing	0
			101. <i>Human uptake</i> terhadap air minum	365 L/th
			102. <i>Human uptake</i> terhadap daging	36,5 kg/th
			103. <i>Human uptake</i> terhadap ikan	36,5 kg/th
			104. <i>Human uptake</i> terhadap tanah	1,1 kg/th
			105. <i>Human inhalation rate</i>	7300 m ³ /th
			106. Fraksi air minum yg disuplai dari sumur	0,5
			107. Fraksi air minum yg disuplai dari sungai	0,2
			108. Fraksi air irigasi yg disuplai dari sumur	0,1
			109. Fraksi air irigasi yg disuplai dari sungai	0,9
			110. Fraksi air minum hewan yg disuplai dari sumur	0,5
	111. Fraksi air minum hewan yg disuplai dari sungai	0,5		

KAJIAN PENGOLAHAN LIMBAH RADIOAKTIF CAIR MENGUNAKAN BEBERAPA ADSORBEN

Mirawaty dan Gustrli Nurlianti

Pusat Teknologi Limbah Radioaktif-Badan Tenaga Nuklir Nasional
Kawasan Puspiptek Serpong Gedung 50, Tangerang Selatan, Banten 15310
Email: mirawaty@batan.go.id

ABSTRAK

KAJIAN PENGOLAHAN LIMBAH RADIOAKTIF CAIR MENGGUNAKAN BEBERAPA ADSORBEN. Limbah radioaktif cair dapat dihasilkan dari kegiatan pencucian alat-alat terkontaminasi dan zat radioaktif yang sudah tidak terpakai. Pusat Teknologi Pengolahan Limbah (PTLR) pada tahun 2014 menerima limbah cair mencapai 64.240 liter, sebagian besar dari kegiatan operasi reaktor yang mengandung radionuklida Cs-137 dan Co-60. Pengolahan limbah radioaktif cair di PTLR dilakukan dengan metode evaporasi. Jika dalam pengolahan terjadi gangguan pada alat penunjang seperti media dan energy, maka proses pengolahan limbah radioaktif cair akan terhambat. Hambatan tersebut harus diatasi dengan mengembangkan metode lain sebagai penunjang metode pengolahan yang ada. Kajian ini untuk mencari alternatif pengolahan limbah radioaktif cair menggunakan adsorben dilakukan dengan cara mencari literatur perbandingan berdasarkan metode yang sama di beberapa negara. Kajian dari beberapa negara diketahui bahwa pengolahan limbah radioaktif cair yang banyak digunakan adalah zeolit, resin penukar ion, bentonit, serta modifikasinya. Dari segi ekonomis, Zeolit lebih baik digunakan karena zeolit yang merupakan bahan alam yang berlimpah di Indonesia. Zeolit dan resin merupakan adsorben yang mempunyai nilai KTK yang relatif lebih besar dibandingkan adsorben lainnya yaitu 0,9 – 2,2 meq/g. Berdasarkan karakteristik limbah radioaktif cair yang diproses di PTLR adsorben yang lebih cocok digunakan adalah zeolit dan resin. Hasil kajian dapat diaplikasikan dengan penelitian lebih lanjut di laboratorium menggunakan limbah yang diolah di PTLR. Sehingga dapat dipastikan metode yang diperoleh dari kajian dapat dipalikasiikan di PTLR.

Kata kunci : limbah radioaktif, adsorben, resin penukar ion, zeolit, bentonit

ABSTRACT

LIQUID RADIOACTIVE WASTE STUDY BASED ON VARIOUS ADSORBENTS. Liquid radioactive waste could generate from the washing process of contaminated equipment and unused liquid radioactive substances. In 2014 Center for Radioactive Waste Technology (CRWT) received 64.240 litres of radioactive waste from reactor activity which mostly consist of Cs-137 and Co-60. Radioactive waste treatment at CRWT is done using evaporation method. If during the treatment process, a malfunction at the supporting apparatus such as the media and power availability occurred, the radioactive waste treatment process will be halted. The obstacle has to be overcome by developing another method as the support of the existing treatment method. The study to find an alternative method of radioactive treatment using adsorbent was done by investigating the available literatures that based on method similarity employed in several countries. This the study from several countries found that the radioactive waste treatments that commonly used are zeolit, ion exchange resin, bentonit and its modifications. Economically, the zeolit is much better to utilize since it is a natural resource and has an abundant availability. The zeolit and resin are adsorbent that has relatively high KTK value compare to other adsorbents, which is 0,9 – 2,2 meq/g. Based on the liquid radioactive waste characteristic that process at CRWT, the suitable adsorbent to utilize are zeolit and resin. Results of the study can be applied to further study at laboratory scale using the existing radioactive waste that process at CRWT. Therefore, the method that found in the study is applicable at CRWT.

Keyword : radioactive waste, adsorbent, ion exchange resin, zeolite, bentonite

PENDAHULUAN

Limbah radioaktif cair merupakan limbah radioaktif yang dihasilkan dari kegiatan pencucian alat-alat yang terkontaminasi, cairan zat radioaktif yang sudah tidak digunakan, ekskresi dari pasien yang sedang pengobatan dengan zat radioaktif, termasuk ekskresi dari binatang percobaan, termasuk aerosol atau gas yang timbul karena penguapan cairan atau dari pembakaran bahan yang dapat terbakar, kegiatan reaktor, dan lain lain. Limbah cair yang di

terima oleh Pusat Teknologi Pengolahan Limbah (PTLR) pada tahun 2014 mencapai 64.240 liter sebagian besar dari kegiatan reaktor yang mengandung radionuklida Cs-137 dan Co-60[1].

Beberapa metode yang dapat digunakan untuk pengolahan limbah radioaktif cair antara lain proses filtrasi, penukar ion, evaporasi, proses kimia (flokulasi, koagulasi, presipitasi, sedimentasi). Pemilihan metode pengolahan tersebut perlu memperhatikan karakteristik dari limbah yang akan diolah. Pengolahan limbah radioaktif cair yang di terima PTLR dilakukan

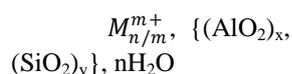
dengan metode evaporasi yang mempunyai spesifikasi 0,75 m³/jam dengan 4 tangki berkapasitas 50 m³ dan menggunakan bahan bakar sebanyak 100 liter/jam. Kondisi alat evaporasi saat ini berfungsi dengan baik, namun peralatan penunjang (media dan suplai energi) sering mengalami kerusakan yang menyebabkan proses pengolahan limbah radioaktif cair sering terhambat. Dengan sering adanya hambatan yang terjadi maka diperlukan metode lain yang dapat digunakan untuk pengolahan limbah radioaktif cair sebagai penunjang alat tersebut.

Pada penelitian ini akan dipelajari pengolahan limbah radioaktif cair menggunakan kolom penukar ion dengan isian adsorben. Proses menggunakan penukar ion mempunyai kelebihan seperti stabilitas kimia, termal dan radiasi yang baik dan selektivitas yang tinggi[2]. Penelitian ini akan difokuskan dengan pengkajian pemilihan bahan adsorben sebagai isian kolom yang dapat digunakan untuk pengolahan limbah radioaktif cair. Pengolahan limbah radioaktif cair menggunakan kolom penukar ion dengan isian adsorben telah banyak dilakukan di beberapa Negara, seperti India [3], China [4], Jepang [5], Pakistan [6], Egypt[7], Korea [5, 6], Brazil [10]. Adsorben yang dapat digunakan untuk pengolahan limbah radioaktif cair seperti zeolit [2, 3, 4, 10, 11], resin penukar ion [6, 8, 12, 13, 14, 15], bentonit [5, 11, 12].

TINJAUAN PUSTAKA

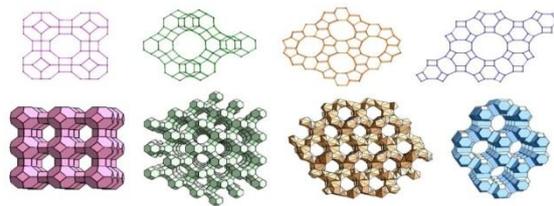
Zeolit

Zeolit adalah mineral kristal alumina silica tetrahidrat berpori yang mempunyai struktur kerangka tiga dimensi, terbentuk oleh tetrahedral [SiO₄]⁴⁻ dan [AlO₄]⁵⁻ yang saling berhubungan oleh atom-atom oksigen, sehingga membentuk kerangka tiga dimensi terbuka yang membentuk rongga-rongga, yang didalamnya terisi oleh ion-ion logam, biasanya adalah logam-logam alkali atau alkali tanah dan molekul air yang dapat bergerak bebas [19,20]. Struktur zeolit yang bermuatan negatif dan berongga terbuka/berpori seperti pada Gambar 1. Zeolit mempunyai kapasitas tukar kation 1,5 – 2 meq/g dan komposisi zeolit terdiri 3 komponen di bawah ini[1, 21]:



Dimana :

M adalah kation bervalensi n, (AlO₂)_x, (SiO₂)_y adalah kerangka zeolit yang bermuatan negatif, H₂O adalah molekul air yang terhidrat dalam kerangka zeolit.



Gambar 1. Struktur Zeolit [1]

Zeolit dibedakan menjadi dua yaitu[21]:

1. Zeolit alam

- Zeolit alam mengandung kation-kation K⁺, Na⁺, Ca²⁺ atau Mg²⁺
- Mengandung molekul air dalam pori dan oksida (Al₂O₃, SiO₂, CaO, MgO, Na₂O, K₂O) bebas di permukaan yang dapat menutupi pori-pori atau bagian aktif dari zeolit sehingga dapat menurunkan kapasitas adsorpsi dan sifat katalis dari zeolit tersebut.
- Untuk meningkatkan kapasitas adsorpsi dan sifat katalis zeolit dapat dilakukan dengan dua cara yaitu cara fisika dan kimia.
- Aktivasi zeolit dengan cara fisika dilakukan dengan pemanasan pada suhu 300-400°C dengan udara panas atau dengan system vakum untuk melepaskan molekul air.
- Sedangkan aktivasi zeolit dengan cara kimia dilakukan dengan pencucian zeolit dengan larutan Na₂EDTA atau asam-asam anorganik (HF, HCl, dan H₂SO₄) untuk menghilangkan oksida-oksida pengotor yang menutupi permukaan pori.

2. Zeolit sintetik

- Zeolit sintetik mengandung kation-kation K⁺ atau Na⁺

Kandungan Si dan Al dalam zeolit berbeda-beda tiap jenis zeolit tergantung rasio Si dan Al yang merupakan perbandingan jumlah atom Si terhadap atom Al di dalam kerangka zeolit. Adanya perubahan rasio Si/Al dari zeolit akan mengubah muatan zeolit sehingga akan mengubah kation penyeimbang dari zeolit. Perbedaan rasio Si/Al akan mempengaruhi sifat dari zeolit itu sendiri, lebih sedikit atom Al maka akan lebih sedikit muatan negatif sehingga lebih sedikit juga kation penyeimbang yang ada, bersifat hidrofobik dan mempunyai afinitas terhadap hidrokarbon.

Zeolit dapat dimanfaatkan sebagai [21]:

1. Sebagai pendehidrasi, zeolit merupakan kristalin yang salah satu komponennya adalah air. Air yang terkandung dalam pori zeolit tersebut dapat lepas dengan proses pemanasan pada suhu 300 hingga 400°C[3,20]. Pemanasan pada suhu tersebut

air dapat keluar dari pori-pori zeolit dimana kation akan berpindah posisi ke tempat yang mempunyai bilangan koordinasi lebih rendah, sehingga zeolit dapat berfungsi sebagai penyerap gas atau cairan.

2. Sebagai penukar ion, kation pada zeolit mempunyai sifat *exchangeable cations* yaitu dapat bergerak dan dipertukarkan dengan ion lain yang terdapat dalam larutan. *Clinoptilolite* merupakan zeolit alam yang digunakan untuk mengolah limbah Cs-137 dari limbah radioaktif, Zeolit A merupakan zeolit sintesis yang mempunyai rasio Si/Al adalah satu dan dapat digunakan untuk mengisolasi stronsium. Modifikasi zeolit (kalsinasi zeolit-H pada suhu 550°C) juga dapat digunakan sebagai adsorben anion (NO^3 , Cl^- , dan SO^4)
3. Sebagai adsorben, dimana zeolit mempunyai struktur yang berpori terbuka dengan luas permukaan yang besar sehingga mampu mengadsorb yang tinggi sehingga dapat digunakan untuk pemurnian dan pemisahan. Selain itu zeolit dapat digunakan sebagai adsorben zat warna dan untuk pemucat minyak sawit mentah.
4. Sebagai katalis, suatu katalis dipengaruhi oleh luas permukaan yang sangat besar sehingga bagian katalitiknya semakin besar, seperti katalis amorf yang dibuat dalam bentuk serbuk. Sedangkan zeolit yang mempunyai roangga memberikan luas permukaan internal yang sangat luas sehingga dapat menampung 100 kali molekul lebih banyak daripada katalis amorf.

Zeolit alam merupakan bahan mineral yang berwarna hijau keputihan dan banyak ditemukan di alam dalam bentuk sedimentasi dan mempunyai rasio Si/Al yang rendah. Namun ada beberapa yang mempunyai porositasnya yang tinggi seperti *clinoptilolite* dan *mordenite*. Kedua jenis zeolit tersebut banyak digunakan sebagai adsorben dan penukar ion untuk pengolahan limbah. Contoh zeolit alam mengandung mineral *analism*, *laumondit*, dan *modernit*.

Zeolit sintesis merupakan zeolit yang dimodifikasi untuk mendapatkan karakter yang sama dengan zeolit alam dan meningkatkan kapasitas fungsinya. Zeolit sintesis sangat bergantung pada jumlah Al dan Si dari bahan penyusunnya. Menurut jumlah komponen Si dan Al sebagai penyusun zeolit, maka zeolit dapat dikelompokkan menjadi 3 yaitu [1,19]:

1. Zeolit sintesis dengan kadar Si rendah.

Zeolit sintesis jenis ini banyak mengandung Al, berpori, mempunyai nilai ekonomi yang tinggi karena efektif untuk pemisahan dengan kapasitas besar. Volume

pori-porinya dapat mencapai $0,5 \text{ cm}^3$ setiap 1 cm^3 volume zeolit.

2. Zeolit sintesis dengan kadar Si sedang.

Jenis zeolit modernit mempunyai perbandingan Si/Al = 5, sangat stabil, maka diusahakan membuat zeolit Y dengan perbandingan Si/Al 1-3. Contoh zeolit sintesis jenis ini adalah zeolit omega.

3. Zeolit sintesis dengan kadar Si tinggi.

Zeolit jenis ini sangat higroskopis dan menyerap molekul non polar sehingga baik untuk digunakan sebagai katalisator asam untuk hidrokarbon.

Bentonit

Bentonit merupakan istilah pada lempung yang mengandung *monmorilonit* dalam dunia perdagangan dan mengandung dioktahedral dan mempunyai kapasitas tukar kation 0,4 – 1,2 meq/g. Bentonite berdasarkan kandungan Al-Si dikelompokkan sebagai berikut [19]:

1. *Activated clay*, kurang memiliki pemucat namun dapat ditingkatkan melalui pengolahan tertentu
2. *Fullers earth*, digunakan untuk pembersih bahan wool dari lemak

Bentonit juga dikelompokkan berdasarkan tipenya seperti dibawah ini:

1. Tipe *Wyoming* (Na-bentonit- bentonit *swelling*)

Bentonit ini mempunyai dara mengembang hingga 8x jika terkena air dan akan tetap terdispersi di dalam air, juga mempunyai sifat mampu membentuk suspensi kental jika bercampur dengan air. Bentonit tipe ini dimanfaatkan sebagai bahan perekat, pengisi (filler), lumpur bor.

2. Mg (Ca-bentonit - bentonit tidak *swelling*)

Bentonit ini mengembang sedikit jika ada air, terdispersi dalam air, secara alami atau diaktifkan mempunyai sifat penyerap yang baik. Bentonit tipe ini digunakan sebagai bahan penyerap.

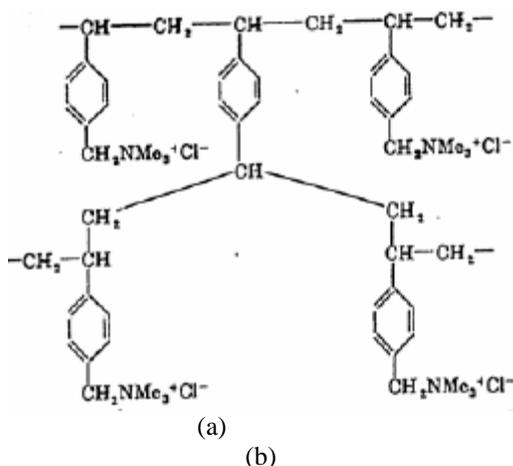
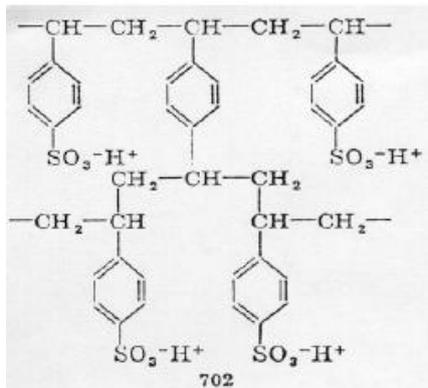
Bentonit di bidang nuklir digunakan sebagai adsorben dalam pengolahan limbah dan sebagai bahan buffer material (bahan isian) dalam penyimpanan limbah pada tanah dangkal dan tanah dalam. Struktur kristal bentonit mempunyai 2 lapisan yaitu lapisan silica (atom silica dalam bentuk tetrahedral) dan lapisan Aluminium (atom aluminium dalam bentuk oktahedral) [20].

Resin

Resin merupakan hidrokarbon terpolimerisasi yang mempunyai ikatan silang dan mengandung kation/anion yang dapat dipertukarkan. Berdasarkan gugus fungsionalnya, resin penukar ion terbagi menjadi dua yaitu resin penukar kation dan resin penukar anion. Resin penukar kation mengandung kation yang dapat dipertukarkan, sedangkan resin penukar anion mengandung anion yang dapat dipertukarkan. Secara umum rumus struktur resin penukar ion kation dan anion ditunjukkan pada Gambar 1 dan Gambar 2. Resin mempunyai sifat sebagai berikut [3,4,20]:

1. Sebagai kapasitas penukar ion dengan kapasitas tukar kation 0,9-2,2 meq/g.
2. Selektivitas, dimana akan menentukan dapat atau tidaknya suatu ion terlepas
3. Derajat ikat silang (*crosslinking*) yang mempengaruhi kapasitas tukar ion
4. Porositas yang berbanding lurus dengan derajat ikat silang
5. Kestabilan resin meliputi kekuatan dan ketahanan gesekan.

Resin di industri nuklir dapat digunakan untuk sistem purifikasi air pendingin di reaktor dan pengolahan limbah radioaktif.



Gambar 1. Resin Penukar Ion (a) Kation (b) Anion

METODE

Kajian pengolahan limbah radioaktif cair menggunakan metode penukar ion menggunakan beberapa adsorben yang dilakukan dengan proses studi literatur dari penelitian yang dilakukan di beberapa negara. Selanjutnya dicari adsorben yang dapat digunakan untuk mengolah limbah radioaktif cair dengan karakteristik yang ada di PTLR.

PEMBAHASAN

Zeolit

Di India telah dilakukan penelitian zeolit yang digunakan untuk pengolah limbah radioaktif cair. Dipelajari kinetika, difusi dan keseimbangan proses pertukaran ion bahan zeolit sintesis komersial dengan proses bath dan kolom. Bahan zeolit komersial digunakan adalah 13X, AR-1,4A (dari Associated Cement Company, Thane, Bombay), dan ZSM-5 (dari United Catalysts India Limited, Baroda). Karakteristik dari zeolit 13X, AR-1,4A berbentuk seperti *vermicelli chips* dengan panjang 3-10 mm dan diameter 2 mm (dibuat ukuran butir 0,25-0,30 mm), sedangkan zeolit ZSM-5 berupa bubuk putih dalam bentuk *binderless*. Hasil karakterisasi dari zeolit yang digunakan dengan kandungan Si dan Al ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi Zeolit Persen Berat Antara Atom Si/Al dan Oksidanya [3]

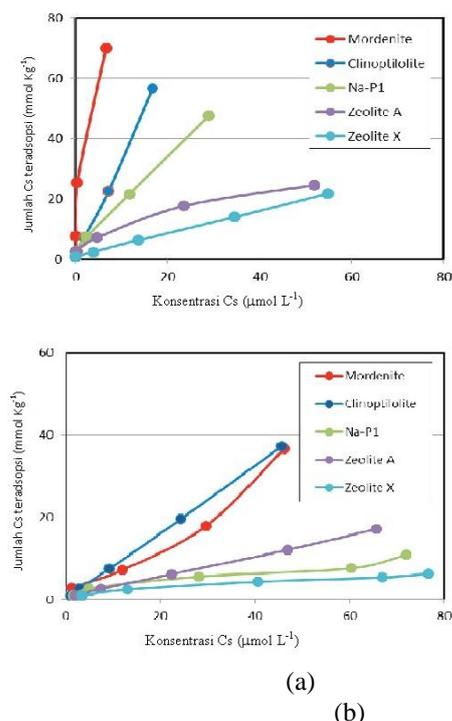
Komponen	13X	AR-1	4A	ZSM-5
Si (SiO ₂)	14.2 (30.4)	30.3 (64.9)	14.3 (30.6)	35.7 (76.5)
Al (Al ₂ O ₃)	12.0 (22.7)	6.5 (12.3)	13.1 (24.7)	4.0 (7.6)
Na (Na ₂ O)	10.9 (14.7)	5.8 (7.8)	11.5 (15.5)	3.6 (4.9)
Loss on Ignition (LOI)	16.4	8.6	14.6	6.5

Penelitian untuk menentukan kinetika proses pertukaran ion dilakukan secara bath dengan pengadukan dan serapan dikendalikan oleh difusi intra-partikel. Sedangkan proses secara kolom dilakukan menggunakan limbah yang sebenarnya dengan *bed volume* 1,5 ml. Hasil penelitian secara bath, zeolit dengan kapastias tukar tinggi untuk pengolahan limbah radioaktif mengandung Cs adalah zeolit 13X dan 4A. Sedangkan secara kolom menghasilkan zeolit AR-1 dapat digunakan untuk mengolah limbah radioaktif yang mengandung padatan terlarut rendah dan tidak ada zeolit dapat digunakan untuk mengolah limbah mengandung padatan terlarut tinggi [3].

Zeolit ZSM-5 merupakan zeolit keluran pabrik yang berdasarkan hasil FT-IR spektrum mempunyai karakteristik seperti zeolit murni.

Zeolit ini mempunyai kemampuan yang tinggi untuk adsorpsi Pb (II) dan U (VI) dan dapat juga digunakan untuk regenerasi. Metode menentukan kapasitas adsorpsi dilakukan secara batch, zeolit ZSM-5 dan NaNO_3 didiamkan selama 24 jam, dimasukkan dalam tabung tes dengan variasi pH, dikocok selama 48 jam. Kemudian dipisahkan antara cairan dan endapan, cairan dianalisis dengan spektrofotometri. Kapasitas adsorpsi zeolit ZSM-5 terhadap Pb (II) dan U (VI) meningkat dengan meningkatnya pH dan menurunnya kekuatan ion yaitu kapasitas adsorpsi maksimum guntukPb(II) 20,1mg/danuntukU(VI) 37,6mg/gpada kondisi pH3,0dan0,010mol/L NaNO_3 [4].

Beberapa jenis zeolit dan modifikasinya dapat digunakan untuk mengolah limbah cair yang mengandung Cs^+ diantaranya mordenit, klinoptilolit, zeolit A sintetik (Linde tipe A dari WAKO Jepang), sintetik zeolit X (dari WAKO Jepang) dan zeolit buatan Na-P1 sebagai referensi (zeolit buatan yang terbuat dari fly ash batubara ditambahkan NaOH). Hasil penelitian Johan dkk menunjukkan kapasitas tukar kation (KTK) zeolit alam lebih rendah dibandingkan zeolit sintetis dan buatan, sedangkan kapasitas adsorpsi Cs^+ jauh lebih besar dari zeolit sintetis dan buatan. Urutan kapasitas adsorpsi Cs^+ adalah mordenit, klinoptilolit, Na-P1, zeolit A, Zeolit X [5]. Zeolit yang mengandung ferrierite dapat digunakan untuk mengolah limbah radioaktif yang mengandung stronsium sama efektifnya dengan zeolit klinoptilolit[12].



Gambar 3. (a) adsorpsi Cs dalam 0,05 M NaCl
(b) adsorpsi Cs dalam 0,05 M NH_4Cl
[5]

Hasil penelitian Endro,zeolit digunakan untuk mengadsorpsi Pb pada limbah B3. Zeolit dengan ukuran (-60+80) mesh yang diaktivasi menggunakan pemanasan 250°C memberikan nilai KTK dari zeolit sebesar 1,904 meq/g. Sedangkan zeolit yang diaktivasi menggunakan larutan $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 0,1M memberikan nilai KTK total sebesar 1,921 meq/g [11].

Bentonit

Bentonit banyak digunakan sebagai bahan *buffer* (bahan isian) dalam penyimpanan limbah radioaktif, sedangkan dalam pengolahan limbah radioaktif cair digunakan untuk menyerap radionuklida-radionuklida. Namun sifatnya yang mudah mengalami *swelling* bentonit dalam penggunaannya harus dimodifikasi salah satunya dengan cara dipilar (dibuat lapisan yang berpori)[20].

Bentonit alam yang dimodifikasi menggunakan 3-aminopropyltriethoxysilane (APS) dan 3,2-aminoetilaminopropyltrimethoxysilane (AEAPS) digunakan untuk mengolah limbah yang mengandung Pb. Hasil penelitian menggunakan metode batch dan kolom dan menunjukkan kapasitas adsorpsi bentonit alam, bentonit – APS dan bentonit – AEAPS masing-masing 20,6843, 27,6524, dan 29,5413 mg/g [10]. Bentonit alam diaktivasi menggunakan termal (TA), asam (AA), dan gabungan termal-asam (ATA) untuk pengolahan limbah logam. Hasil aktivasi dapat meningkatkan luas permukaan dan porositas bentonit alam [17]. Sedangkan modifikasi menggunakan organo-bentonit dapat meningkatkan kapasitas adsorpsi dengan meningkatnya panjang rantai alkil [18].

Bentonit lokal dari Pakistas digunakan untuk penyerapan limbah yang mengandung Cs, dilakukan dengan parameter waktu kontak, pH dan beberapa parameter termodinamika. Penelitian dilakukan secara batch dengan 0,5 g bentonite dalam 10 ml larutan yang mengandung Cs diaduk dengan kecepatan 4500 rpm selama waktu dan pH yang divariasikan, selanjutnya supernatan dianalisis. Hasil penelitian pengaruh waktu kontak menunjukkan tingkat serapan cesium yang cepat, pengaruh pH menunjukkan nilai koefisien distribusi lebih rendah, pengaruh jumlah bentonit dapat meningkatkan penyerapan Cs dan pengaruh konsentrasi larutan Cs menunjukkan nilai koefisien distribusi menurun dengan meningkatnya konsentrasi larutan Cs. Nilai $\Delta H^\circ = -32,29 \text{ KJ / mol}$ dan $\Delta G^\circ = -13,16 \text{ KJ / mol}$ pada 298 K menunjukkan bahwa serapan cesium pada bentonit adalah eksotermis dan proses spontan. Sedangkan nilai AG menjadi lebih negatif pada suhu yang lebih tinggi menyebabkan penyerapan Cs berkurang, dan

adanya kation $K^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^+$ menurunkan penyerapan Cs pada bentonit [22].

Penelitian pengolahan limbah yang mengandung Sr menggunakan bentonit dengan metode yang sama diatas, menunjukkan Nilai $\Delta H^\circ = 30,62 \text{ KJ / mol}$ dan $\Delta G^\circ = -10,69 \text{ KJ / mol}$ pada 298 K. Hal tersebut menunjukkan bahwa serapan Sr pada bentonit adalah proses spontan. Nilai AG menjadi lebih negatif pada suhu yang lebih tinggi sehingga menunjukkan proses penyerapan lebih menguntungkan pada suhu yang lebih tinggi. Adanya kation $Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+ > Na^+$ menurunkan penyerapan Sr pada bentonit [6].

Resin

Pengkajian termodinamika dan kinetika resin Amberlite IRA-910 yang digunakan untuk adsorpsi uranium (VI) dengan metode secara batch dengan variasi konsentrasi, keasaman, waktu kontak, dan suhu. Hasil pengkajian menunjukkan nilai ΔH° dan ΔG° adsorpsi uranium pada amberlite IRA-910 menghasilkan adsorpsi panas endotermik [13]. Limbah yang mengandung uranium juga dapat diadsorpsi menggunakan resin penukar anion Amberlite CG-400. Adsorpsi uranium mencapai kapasitas maksimum dengan laju alir 0,2 ml/menit, tinggi bed volume 9,1 cm (4 g resin) dan untuk recovery uranium menggunakan eluen 0,5 mol/l HNO_3 [23]. Pada penelitian lain dipelajari juga dengan adanya anion fosfat menunjukkan pH optimum 3,5 dan kinetika penyerapan uranium adalah proses cepat dan penyerapan secara isotherm. Kapasitas penyerapan uranium tanpa adanya anion fosfat 57,14 dan adanya anion fosfat 112,36 mg/g [24].

Pengolahan limbah radioaktif yang mengandung Cs dan Co menggunakan resin penukar kation jenis lewatis yang dilakukan secara bath dan kolom. Kapasitas penyerapan optimum Cs dan Co menggunakan resin lewatis pada pH optimum 6, kinetika keseimbangan pada waktu 120 menit dan nilai afinitas resin lewatis terhadap Cs lebih besar dari Co, kapasitas penyerapan juga di pengaruhi laju alir dan tinggi kolom [7]. Resin yang mengandung konsentrasi C-14 tinggi mempunyai nilai afinitas adsorpsi terhadap Co^{2+} dan Cs^+ relatif lebih tinggi dari kation lain [8].

Limbah radioaktif yang mengandung garam asam mineral dapat mempengaruhi proses penyerapan menggunakan resin, penelitian yang dilakukan di Rusia resin dimodifikasi dengan menambahkan ligan asam mineral yang mampu meningkatkan efisiensi tukar kation pada pengolahan limbah tersebut. Penambahan ligan anorganik pada resin dapat mempengaruhi efisiensi tukar kation pengolahan limbah yaitu untuk menekan terjadinya proses

pengkomplekan. Untuk menekan hal tersebut dalam penelitian yang dilakukan A. S. Chugunov menggunakan resin penukar kation dengan bentuk terprotonasi sehingga dapat mengurangi densitas ligan dengan koreksi pH [15].

Resin dowex yang dimodifikasi dengan penambahan Fe digunakan untuk menghilangkan nitrat, penambahan sulfat yang dapat menurunkan kapasitas adsorpsi nitrat sedangkan penambahan KCl dapat meningkatkan kapasitas adsorpsi nitrat hingga 95% [9]. Resin amberlit IRA 402 digunakan untuk adsorpsi uranium seperti yang dilakukan penelitian oleh M. Solgy menunjukkan kesetimbangan adsorpsi mengikuti model isotherm Freundlich dengan kapasitas adsorpsi maksimum resin amberlit untuk uranium menjadi 213 mg/g pada suhu 25°C [16].

Resin amberlit IR 120 dapat digunakan untuk adsorpsi Cs yang dipengaruhi dengan pH dan suhu dimana pengaruh pH awal ion Cs signifikan terhadap kapasitas adsorpsi dibandingkan pengaruh suhu. Adsorpsi Cs menggunakan resin amberlit IR-120 lebih maksimal pada kondisi isotherm dan berdasarkan persamaan Langmuir cocok untuk adsorpsi isotherm dengan komponen tunggal. Sedangkan untuk adsorpsi heterogen untuk Cs meningkat dengan meningkatnya suhu dan penurunan pH [25]. Sejumlah penelitian resin modifikasi *spherical resorcinol-formaldehyde* (SRF) sangat efektif digunakan untuk mengolah limbah yang mengandung Cs-137 [14].

Data limbah radioaktif cair yang diterima PTLR pada tahun 2013 dan 2014 sebagian besar mengandung Cs dan Co [1]. Pemilihan adsorben yang dapat digunakan untuk mengolah limbah radioaktif berdasarkan kapasitas tukar kation yang tinggi. Berdasarkan pengalaman beberapa Negara, adsorben yang sering digunakan untuk mengolah limbah radioaktif cair adalah zeolit dan resin penukar ion yang mempunyai kapasitas tukar kation yang relatif lebih tinggi dibandingkan dengan adsorben yang lain.

KESIMPULAN

Hasil kajian pengolahan limbah radioaktif cair menggunakan adsorben dari beberapa negara, adsorben yang banyak digunakan adalah zeolit, resin penukar ion, bentonit, dan lain-lain. Dari segi ekonomis untuk pengolahan limbah radioaktif dapat digunakan zeolit yang merupakan bahan alam yang berlimpah di Indonesia. Zeolit dan resin merupakan adsorben yang mempunyai nilai KTK yang relatif lebih besar dibandingkan adsorben lainnya yaitu 0,9 – 2,2 meq/g. Berdasarkan karakteristik limbah radioaktif cair yang diproses di PTLR, adsorben yang dapat digunakan adalah

zeolit dan resin. Hasil kajian dapat diaplikasikan dengan penelitian lebih lanjut dilaboratorium menggunakan limbah yang diolah di PTLR. Sehingga dapat dipastikan metode yang diperoleh dari kajian dapat dipalikasiikan di PTLR.

DAFTAR PUSTAKA

1. A. Muziyawati, "Pengelolaan Data Limbah Radioaktif Di Pusat Teknologi Limbah Radioaktif," in *Prosiding Hasil Penelitian dan Kegiatan PTLR Tahun 2014*, ISSN 0852-2979, 2015, pp. 259–271.
2. R. O. A. Rahman, H. A. Ibrahim, and Y.-T. Hung, "Liquid Radioactive Wastes Treatment: A Review," *Water*, vol. 3, no. 4, pp. 551–565, 2011.
3. P. K. Sinha, P. K. Panicker, R. V. Amalraj, and V. Krishnasamy, "Treatment of radioactive liquid waste containing caesium by indigenously available synthetic zeolites: A comparative study," *Waste Manag.*, vol. 15, no. 2, pp. 149–157, 1995.
4. X. Wang, D. Shao, G. Hou, X. Wang, A. Alsaedi, and B. Ahmad, "Uptake of Pb(II) and U(VI) ions from aqueous solutions by the ZSM-5 zeolite," *J. Mol. Liq.*, vol. 207, pp. 338–342, 2015.
5. E. Johan, T. Yamada, M. W. Munthali, P. Kabwadza-Corner, H. Aono, and N. Matsue, "Natural Zeolites as Potential Materials for Decontamination of Radioactive Cesium," *Procedia Environ. Sci.*, vol. 28, no. Sustain 2014, pp. 52–56, 2015.
6. S. A. Khan and M. A. Khan, "Sorption of strontium on bentonite," *Waste Manag.*, vol. 15, no. 8, pp. 641–650, Jan. 1995.
7. H. A. Ibrahim, "Sorpitive Removal of Cesium and Cobalt Ions in a Fixed bed Column Using Lewatit S100 Cation Exchange Resin," vol. 47, no. 13, pp. 77–93, 2014.
8. S.-C. PARK, H.-R. CHO, J.-H. LEE, H.-Y. YANG, and O.-B. YANG, "A STUDY ON ADSORPTION AND DESORPTION BEHAVIORS OF ^{14}C FROM A MIXED BED RESIN," *Nucl. Eng. Technol.*, vol. 46, no. 6, pp. 847–856, Dec. 2014.
9. S. Rengaraj, K.-H. Yeon, S.-Y. Kang, J.-U. Lee, K.-W. Kim, and S.-H. Moon, "Studies on adsorptive removal of Co(II), Cr(III) and Ni(II) by IRN77 cation-exchange resin," *J. Hazard. Mater.*, vol. 92, no. 2, pp. 185–198, May 2002.
10. D. J. L. Guerra, I. Mello, R. Resende, and R. Silva, "Application as absorbents of natural and functionalized Brazilian bentonite in Pb^{2+} adsorption: Equilibrium, kinetic, pH, and thermodynamic effects," *Water Resour. Ind.*, vol. 4, pp. 32–50, Dec. 2013.
11. E. Kismolo, "Karakterisasi Kapasitas Tukar Kation Zeolit Untuk Pengolahan Limbah B3 Cair," in *Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah - Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir 2012*, 2012, pp. 245–251.
12. A. Dyer and D. Keir, "Nuclear waste treatments by zeolites," *Zeolites*, vol. 4, no. 7, pp. 215–218, 1984.
13. A. Rahmati, A. Ghaemi, and M. Samadfam, "Kinetic and thermodynamic studies of uranium(VI) adsorption using Amberlite IRA-910 resin," *Ann. Nucl. Energy*, vol. 39, no. 1, pp. 42–48, Jan. 2012.
14. RL Russell DE Rinehart RA Peterson, "Ion Exchange Kinetics Testing with SRF Resin," April, United States of America: Pacific Nortest National Laboratory, 2012, p. .
15. A. S. Chugunov, A. V. Rummyantsev, V. A. Vinnitskiy, and A. F. Nechaev, "Effects of inorganic ligands on the efficiency of ion-exchange treatment of radioactive waste," *Nucl. Energy Technol.*, Feb. 2016.
16. M. Solgy, M. Taghizadeh, and D. Ghoddocynejad, "Adsorption of uranium(VI) from sulphate solutions using Amberlite IRA-402 resin: Equilibrium, kinetics and thermodynamics study," *Ann. Nucl. Energy*, vol. 75, pp. 132–138, Jan. 2015.
17. M. Toor, B. Jin, S. Dai, and V. Vimonses, "Activating natural bentonite as a cost-effective adsorbent for removal of Congo-red in wastewater," *J. Ind. Eng. Chem.*, vol. 21, pp. 653–661, Jan. 2015.
18. H. Zaghouane-Boudiaf, M. Boutahala, S. Sahnoun, C. Tiar, and F. Gomri, "Adsorption characteristics, isotherm, kinetics, and diffusion of modified natural bentonite for removing the 2,4,5-trichlorophenol," *Appl. Clay Sci.*, vol. 90, pp. 81–87, Mar. 2014.
19. Tekmira, "Bentonite." [Online]. Available: <http://www.tekmira.esdm.go.id/data/Bentonit/ulasan.asp?xdir=Bentonit&commId=8&comm=Bentonit>. [Accessed: 10-

- Sep-2015].
20. H. Zamroni, "Lempung Berpilar Untuk Keselamatan Pengelolaan Limbah Radioaktif," in *Seminar Tahunan Pengawasan Pemanfaatan Tenaga Nuklir*, 2003.
 21. S. V. S. Rao, A. G. S. Mani, S. Karua, M. Cheralathan, A. Reddy, S. K. Khandelwal, and B. Paul, "Treatment of liquid wastes using composite resins," *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, vol. 307, no. 1, pp. 463–469, 2016.
 22. S. Ali Khan and M. Ali Khan, "Sorption of cesium on bentonite," *Waste Manag.*, vol. 14, no. 7, pp. 629–642, Jan. 1994.
 23. H. Tavakoli, H. Sepehrian, F. Semnani, and M. Samadfam, "Recovery of uranium from UCF liquid waste by anion exchange resin CG-400: Breakthrough curves, elution behavior and modeling studies," *Ann. Nucl. Energy*, vol. 54, pp. 149–153, Apr. 2013.
 24. F. Semnani, Z. Asadi, M. Samadfam, and H. Sepehrian, "Uranium(VI) sorption behavior onto amberlite CG-400 anion exchange resin: Effects of pH, contact time, temperature and presence of phosphate," *Ann. Nucl. Energy*, vol. 48, pp. 21–24, Oct. 2012.
 25. T. Y. Kim, S. S. An, W. G. Shim, J. W. Lee, S. Y. Cho, and J. H. Kim, "Adsorption and energetic heterogeneity properties of cesium ions on ion exchange resin," *J. Ind. Eng. Chem.*, vol. 27, pp. 260–267, Jul. 2015.

STUDI EKSPERIMEN DIFUSI BORON DALAM BENTONIT TERKOMPAKSI DALAM KONDISI REDUKSI OLEH FE

Mas Udi *, Noria Ohkubo**

*PTLR BATAN Kawasan Puspiptek Serpong Tangerang 15310

**Department of Applied Quantum Physics and Nuclear Engineering, Graduate School of Engineering,
Kyushu University, Fukuoka 812-8581, Japan

Email : Masudi @batan.go.id

ABSTRAK

STUDI EKSPERIMEN DIFUSI BORON DALAM BENTONIT TERKOMPAKSI DALAM KONDISI REDUKSI OLEH FE. Setelah kecelakaan pembangkit listrik tenaga nuklir Daiichi Fukushima tahun 2011, dihasilkan limbah radioaktif dan di sekitar area sistem disposal limbah radioaktif ditutupi dengan bentonit. Ada sejumlah besar boron dalam limbah, mungkin berdampak buruk pada lingkungan bila boron adalah untuk bermigrasi melalui bentonit. Di samping itu pada sistem vitrifikasi limbah radioaktif aktivitas tinggi, dimana limbah dikapsulasi dalam baja karbonoverpack kemudian didisposal dalam lingkungan bentonit di tanah dalam. Dalam periode tertentu, air tanah akan kontak dengan baja karbon, kandungan boron yang digunakan dalam gelas vitrifikasi ada kemungkinan bermigrasi melewati bentonit. Eksperimen elektromigrasi dilakukan untuk memahami perilaku difusi boron di bentonit. Sejumlah kecil solusi tracer (asam borat dan tetra-borate) secara merata dipipet pada salah satu ujung permukaan bentonit. Kupon baja karbon dirakit sebagai anoda kemudian dialiri potensial listrik. Setelah migrasi dan difusi dalam periode tertentu, spesimen bentonit diiris dengan ukuran 0,5 sampai 2 mm. Konsentrasi boron di setiap irisan dapat diukur dengan ICP-MS, Agilent, 7500C. Maka diperoleh koefisien difusi (D_a) dari boron dalam asam borat adalah $8.43 \times 10^{-11} \text{ (m}^2/\text{s)}$, dan asam tetraborat $1.61 \times 10^{-11} \text{ (m}^2/\text{s)}$.

Kata Kunci : Bentonit, Koefisien difusi, Elektromigrasi

ABSTRACT

EXPERIMENTAL STUDY ON BORON DIFFUSION IN COMPACTED BENTONITE UNDER REDUCING CONDITION WITH IRON. After the previous Fukushima-Daiichi power plant accident, it generated radioactive waste and around the radioactive waste will be given to disposal covered with bentonite. There is a large amount of boron in the waste, may have an impact on the environment that boron is to migrate through the bentonite. The other hand vitrified waste for high-level waste will be encapsulated into carbon steel overpack then disposed with bentonite in deep underground. After a long period of time elapsed, the fact that groundwater is in contact with the vitrified corrode carbon steel, boron that was used in the glass solidification it considered that there is a possibility to migrate through the bentonite. Electromigration experiment was doing for understand the diffusion behavior of boron in bentonite. Electromigration experiments have been carried out with source of iron. Iron supplied by anode corrosion of iron coupon. A small amount of tracer solution (boric acid and tetra-borate) was uniformly pipetted on an end surface of bentonite. The carbon steel coupon was assembled with water saturated bentonite as anode then supplied electric potential. After migration and diffusion period the bentonite specimen was sliced in the step of 0.5 to 2 mm. The concentration of boron in each slice can be measured with inductively couple plasma-mass spectrometry (ICP-MS; Agilent, 7500C). It was obtained apparent diffusion coefficient (D_a) of boron in boric acid is $8.43 \times 10^{-11} \text{ (m}^2/\text{s)}$, and tetraborate acid is $1.61 \times 10^{-11} \text{ (m}^2/\text{s)}$.

Keywords : bentonite, Diffusion coefficient, electromigration.

PENDAHULUAN

Bentonit telah dipilih sebagai bahan penyangga potensial dalam rencana disposal limbah radioaktif di banyak negara. Oleh karena itu, difusi ion radioaktif dalam bentonit sangat penting untuk kajian keselamatan pada sistem disposal limbah radioaktif [1]. Setelah kecelakaan pembangkit listrik nuklir Daiichi Fukushima tahun 2011 dihasilkan limbah radioaktif dalam jumlah yang besar. Upaya penanggulangan

terhadap bahaya radiasi dari limbah tersebut maka di sekitar area pembuangan limbah radioaktif ditutupi dengan bentonit. Bentonit berfungsi sebagai pengungkung limbah. Ada sejumlah besar boron dalam limbah tersebut yang dalam teras reaktor sering digunakan sebagai batang kendali karena efektif dalam menyerap neutron dan akan berdampak buruk pada lingkungan bila mampu bermigrasi melewati bentonit. Di samping itu pada sistem vitrifikasi limbah radioaktif aktivitas tinggi,

dimana limbah dikapsulasi dalam baja karbon overpack kemudian limbah didisposal dalam lingkungan bentonit. Pada kenyataan yang terjadi bahwa dalam periode tertentu air tanah akan mengalami kontak dengan baja karbon dan akan mengakibatkan korosi pada logam tersebut, boron yang digunakan dalam gelas vitrifikasi ada kemungkinan bermigrasi melalui bentonite. Oleh karena itu perlu diketahui fenomena migrasi boron di dalam bentonit dalam suasana pengaruh korosi logam. Tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui koefisien difusi boron di bentonit dalam kondisi reduksi Fe dan muatan ion boron dan profil Fe serta penetrasi konsentrasi natrium dalam spesimen bentonit.

METODOLOGI

Material

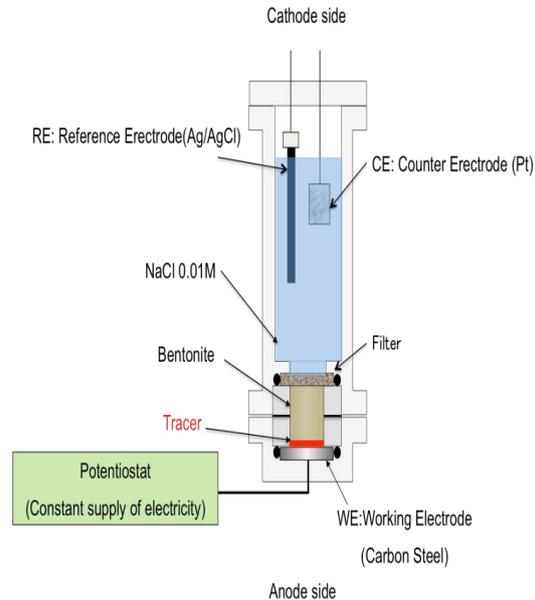
Na-bentonit khas Jepang, Kunifia F digunakan dalam percobaan ini. Bentonit tipe ini berisi sekitar 95% berat montmorillonite. bubuk bentonit telah dipadatkan dalam bentuk silinder dengan ukuran diameter 10 mm dan tinggi 10 mm dengan kepadatan kering 1,0 atau 1,2 kg/m³. bentonit dipadatkan dimasukkan dalam resin akrilik. Baja karbon SM 41B digunakan dalam penelitian ini [2]. Baja karbon dipotong menjadi kupon silinder 18 mm dan 3 mm tebal. Permukaan kupon basah dipoles dengan kertas amplas ukuran # 400, # 800, # 1200, dan # 2000

Percobaan elektromigrasi

Sejumlah kecil larutan tracer (asam borat (H₃BO₃) dan asam tetraborat (H₂B₄O₇)) itu dipipet secara merata pada salah satu ujung permukaan bentonit. Kupon baja karbon dipasang pada ujung bawah bentonit jenuh yang sudah direndam air. Atur elektroda yang diperlukan. Ada 3 jenis elektroda. elektroda kerja, elektroda referensi dan elektroda counter. Kupon baja karbon disambungkan ke potensiostat sebagai elektroda kerja dan digunakan potensial listrik dari -300 mV dan Ag / AgCl elektroda sebagai elektroda referensi dan dioperasikan selama 2 - 4 hari untuk difusi. Rangkaian elektrokimia dipasang seperti gambar 1.

Setelah proses elektrokimia dilakukan dalam waktu yang sudah ditetapkan, spesimen bentonit dipisahkan dari kolom dan dipotong menjadi irisan setebal 0,5-2 mm. Profil konsentrasi boron dalam bentonit ditentukan dengan menimbang berat setiap irisan yang sudah dikeringkan dalam oven pada suhu 100 °C selama 4 jam. Setiap irisan yang sudah ditimbang kemudian dilarutkan

dalam larutan HNO₃ IM untuk proses ekstraksi boron yang ada di dalamnya. Setelah fase cair diekstraksi dengan proses sentrifugasi (6000 x 6 min, 3500g), pisahkan supernatan dan ekstraknya. Kemudian dilakukan analisis terhadap supernatan yang diambil dengan menggunakan ICP - MS (Agilent 7500C) untuk menentukan konsentrasi boron yang terkandung di setiap irisan bentonit. Profil konsentrasi Fe dan konsentrasi natrium yang melalui spesimen bentonit dapat diukur dengan AAS.



Gambar 1. Skema rangkaian peralatan elektromigrasi

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasar Persamaan Hukum Fick. Koefisien difusi (D_a) dapat dihasilkan dari koefisien garis dari grafik variasi konsentrasi (t, x) sebagai fungsi jarak, x. Dalam bentuk logaritma persamaannya adalah sebagai berikut:

$$\ln C = -\frac{x^2}{4D_a t} + \ln \frac{M}{\sqrt{4D_a t}}$$

Maka dihasilkan D_a dari boron dalam asam borat adalah 8.43 x 10⁻¹¹ (m²/s), dan D_a boron dalam asam tetra borat adalah 1.61 x 10⁻¹¹ (m²/s), sebagaimana ditunjukkan dalam grafik di bawah ini:

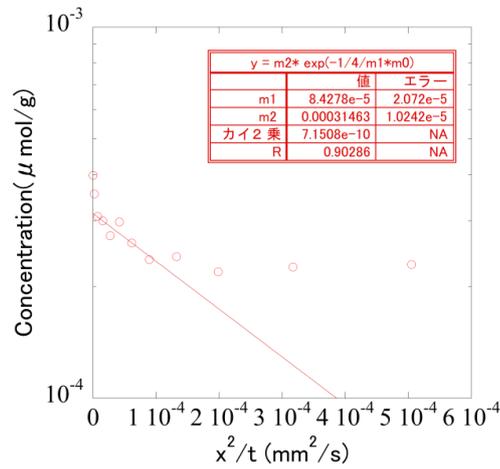


Fig. 2. Koefisien Difusi boron dalam H_3BO_3

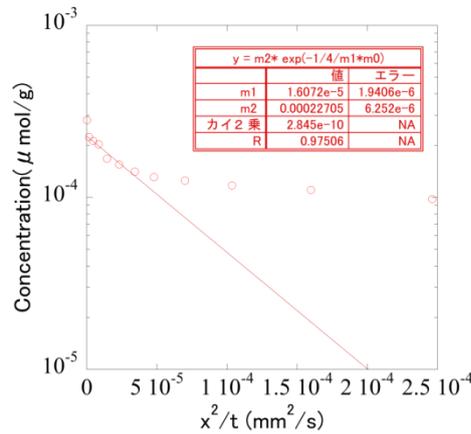


Fig. 3. Koefisien Difusi boron dalam $H_2B_4O_7$

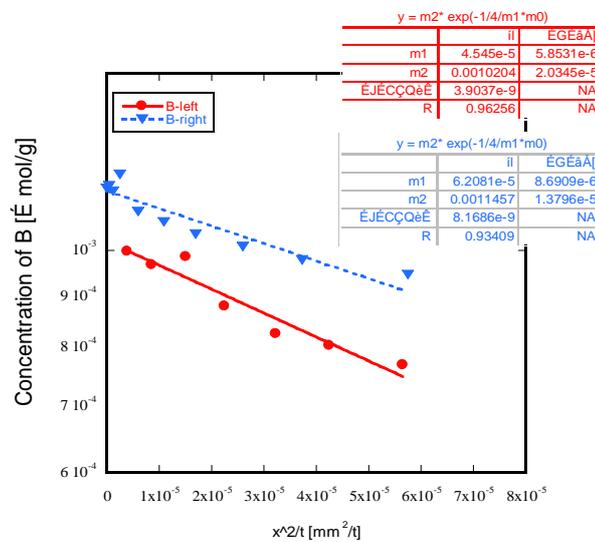


Fig. 4. Apparent diffusion coefficient of boron in boric acid from the 5 mm depth of the compacted bentonite

Jadi koefisien difusi boron di bentonite dalam bentuk senyawa boric acid (H_3BO_3), lebih tinggi dari pada dalam bentuk tetraborate acid ($H_2B_4O_7$).

Dalam percobaan ini juga dapat digunakan untuk menentukan muatan boron,

yaitu dengan cara meletakkan cuplikan boron ditengah-tengah bentonit. Potong bentonite menjadi dua bagian. Oleskan larutan perunut ditengahnya. Kemudian lakukan eksperimen elektromigrasi. Hasilnya dapat dilihat dari gambar dibawah ini:

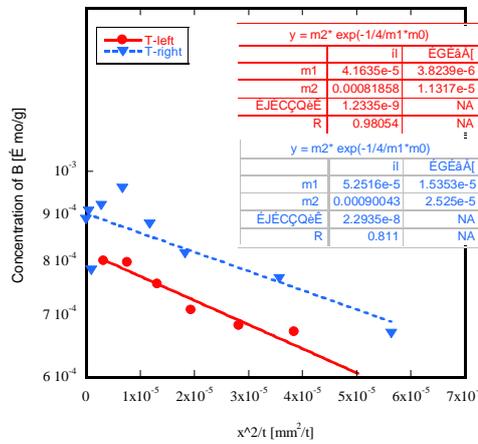


Fig.5 Apparent diffusion coefficient of boron in tetra borate from the 5 mm depth of the compacted bentonite

Maka akan dihasilkan D_a boron pada dua sisi bentonite, pada sisi kiri D_a boron pada larutan Asam borat adalah $4.545 \times 10^{-11} \text{ (m}^2/\text{s)}$, pada sisi kanan dihasilkan D_a adalah $6.208 \times 10^{-11} \text{ (m}^2/\text{s)}$. D_a boron di sisi kiri pada Tetra borat adalah

$4.164 \times 10^{-11} \text{ (m}^2/\text{s)}$ dan di sisi kanan D_a yang dihasilkan adalah $5.252 \times 10^{-11} \text{ (m}^2/\text{s)}$. Dari D_a yang dihasilkan menunjukkan boron bermigrasi ke arah sisi katoda karena pada keduanya D_a yang ke arah kanan lebih besar.

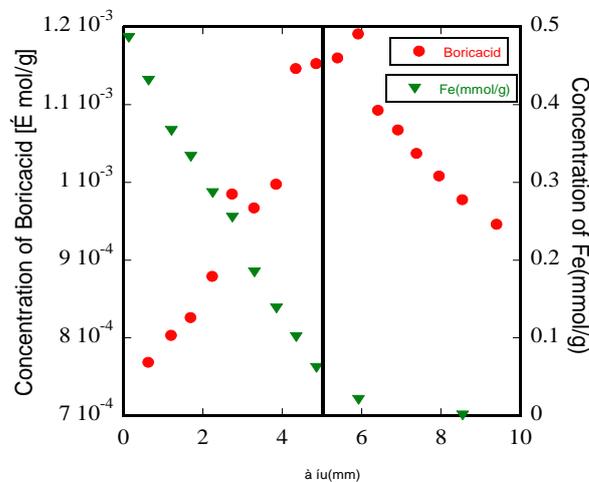


Fig. 6. Migration profile of boric acid from the 5 mm depth of the compacted bentonite

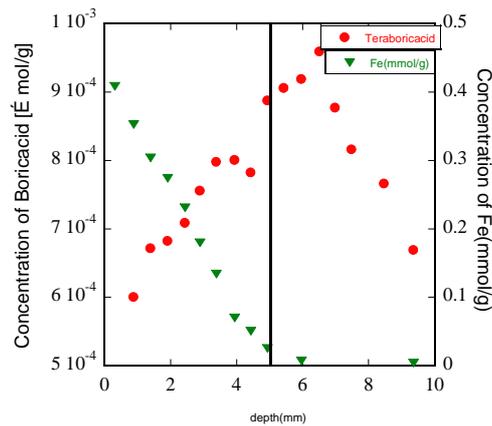


Fig.7 Migration profile of tetra borate from the 5 mm depth of the compacted bentonite

Gambar 6 dan 7 menggambarkan profil migrasi dari boron dalam bentonite, hasil dari keduanya menunjukkan fenomena yang sama, bahwa ada kecenderungan boron bergerak ke arah katoda. Tapi hasil ini belum mampu menunjukkan muatan dari boron karena ada beberapa keganjilan dari gambar yang ditampilkan. Oleh karena itu perlu dilakukan eksperimen lebih lanjut, dengan mengamati pengaruh beberapa parameter lainnya, seperti pengaruh suhu, densitas bentonite, dan pH larutan.

KESIMPULAN

Dari percobaan yang dilakukan dihasilkan:

1. Koefisien difusi boron dalam bentonite pada larutan Asam Borate adalah 8.43×10^{-11} (m^2/s), pada larutan tetra borat adalah 1.61×10^{-11} (m^2/s). Koefisien difusi boron di bentonite dalam bentuk senyawa boric acid (H_3BO_3), lebih tinggi dari pada dalam bentuk tetraborate acid ($\text{H}_2\text{B}_4\text{O}_7$).

2. Dari D_a yang dihasilkan menunjukkan boron bermigrasi ke arah sisi katoda karena pada keduanya D_a yang ke arah kanan lebih besar. Tapi hasil ini belum mampu menunjukkan muatan dari boron karena ada beberapa keganjilan dari gambar yang ditampilkan. Perlu dilakukan eksperimen lebih lanjut.

DAFTAR PUSTAKA

1. K. Idemitsu, H. Kozaki, M. Yuhara, T. Arima, and Y. Inagaki, "Diffusion behavior of selenite in purified bentonite," *Prog. Nucl. Energy*, pp. 1–7, 2015.
2. "Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University, Vol. 67, No. 1, March 2007," vol. 67, no. 1, 2007.

PENGOLAHAN LIMBAH URANIUM CAIR DENGAN RESIN ANION AMBERLITE IRA-400 CI DAN IMOBILISASI RESIN JENUH MENGGUNAKAN POLIMER

Dwi Luhur Ibnu Saputra¹, Wati¹, Nurhayati²

¹Pusat Teknologi Limbah Radioaktif - BATAN,

²Fakultas Teknik Universitas Satya Negara Indonesia

Email: ibnu.saputra@batan.go.id

ABSTRAK

PENGOLAHAN LIMBAH URANIUM CAIR DENGAN RESIN ANION AMBERLITE IRA-400 CI DAN IMOBILISASI RESIN JENUH MENGGUNAKAN POLIMER. Limbah uranium yang berasal dari fase rafinat hasil ekstraksi uranium sisa produksi radioisotop Mo⁹⁹ mengandung banyak radionuklida hasil belah dan uranium dengan konsentrasi rendah. Reduksi volume limbah dilakukan dengan proses penyerapan maksimal uranium yang membentuk [UO₂(SO₄)₃]⁻⁴ dengan resin penukar anion amberlite IRA 400 CI dalam kolom secara kontinyu. Kondisi tersebut berlangsung sampai waktu operasi selama 45 jam hingga resin menjadi jenuh. Analisis kandungan uranium diukur menggunakan alat spektrometer UV-Vis. Resin jenuh uranium di imobilisasi menggunakan polimer sesuai dengan standar IAEA. Proses imobilisasi dilakukan dengan mencampur resin jenuh dan polimer poliester dengan variasi kandungan limbah 10, 20, 30, 40, dan 50% berat/berat dalam seriform. Karakterisasi ketahanan polimer dilakukan dengan uji densitas, uji kuat tekan dan laju pelindihan diukur menggunakan alat tekan hidrolik dan soxhlet. Kondisi optimum imobilisasi pada kandungan limbah 20% didapat dengan densitas sebesar 1,1490 g/cm³, kuat tekan 4,342 kN/cm², dan laju pelindihan 0,0011 gram/cm².hari

Kata kunci :pengolahan limbah uranium, resin anion, imobilisasi, polimer

ABSTRACT

TREATMENT OF LIQUID URANIUM WASTE WITH ANION EXCHANGE RESIN AMBERLITE OF IRA – 400 CI AND IMMOBILIZATION RESIN SATURATED URANIUM USING POLYMER.Waste uranium of rafinat from uranium extractionproces of Mo⁹⁹ radioisotope production contain many radionuclides fission product and uranium low concentration. Waste volume reduction is done with maximum absorption process of uranium that forms [UO₂(SO₄)₃]⁻⁴ with anion exchange resin Amberlite of IRA 400 CI in continuous column.The optimum condition was achieved 45 haur operation until resin become saturated. Analysis of uranium was measured by UV – Vis Spectrometer. According to the standart of IAEA that immobilization of the saturated resin usepolimer. The immobilization process was carried out by mix the saturated resin and polyester polymer with variety of waste loading 10, 20, 30, 40 dan 50 % in seriform. Resistance charackeristic of polimer conducted with test of density, and also test of compressive strength and leaching rate measured using a hydraulic press and soxhlet.The optimum condition for the immobilization were obtained on waste loading 20 weight %, with density is 1,1490 g/cm³, compressive strength is 4,342kN/cm² and leaching rate is 0,0011 gram/cm².day

Keyword : waste uranium treatment, anion resin, immobilization, polimer

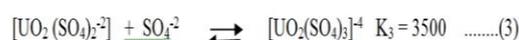
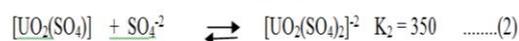
PENDAHULUAN

Produksiisotop Mo⁹⁹ dihasilkan dari Instalasi Produksi Radioisotop di BATAN. Isotop Mo⁹⁹ dihasilkan dari reaksi U²³⁵ dengan neutron di dalam reaktor nuklir G.A Siwabessy. U²³⁵ akan mengalami reaksi fisi (pembelahan) menjadi hasil belah diantaranya Mo⁹⁹ sedangkan U²³⁸ mengalami reaksi aktivasi neutron menjadi unsur – unsur aktinida [1]. Bahan bakar atau kapsul yang dilapisi uranium diiradiasi dalam reaktor kemudian dilarutkan dalam HNO₃ 6 – 8 M. Dalam larutan tersebut mengandung uranium yang konsentrasinya masih tinggi, hasil belah termasuk Mo⁹⁹ dan aktinida.Radionuklida Mo⁹⁹ diambil menggunakan larutan Al₂O₃. Uranium

dalam larutan dipisahkan secara ekstraksi menggunakan pelarut tributil fosfat dodekan [2]. Hasil dari proses ekstraksi yaitu fase ekstrak yang banyak mengandung uranium dan sedikit radionuklida hasil belah, serta fase rafinat yang didominasi radionuklida hasil belah dan uranium dengan konsentrasi rendah. Uranium sisa dengan konsentrasi rendah dan banyak mengandung hasil belah merupakan limbah cair yang akan diproses lebih lanjut dengan resin penukar anion. Limbah cair dari hasil ekstraksi uranium tidak dapat yang diolah di evaporasi Instalasi Pengolahan Limbah Radioaktif (IPLR) karena tingkat keasaman yang tinggi dan IPLR hanya mengolah limbah cair dengan aktivitas rendah[3]. Uranium konsentrasi rendah, hasil

belah dan aktinida dalam bentuk kation merupakan limbah cair yang dikomplekskan dengan Na_2SO_4 sehingga membentuk senyawa anion akan diproses lebih lanjut dengan resin penukar ion anion hingga resin tersebut jenuh. Jika menggunakan resin penukar kation maka, UO_2^{+2} akan kompetitif dengan kation hasil belah yang lain.

Limbah uranium cair ini dikomplekskan dengan Na_2SO_4 sehingga menjadi [4]



Selanjutnya ion kompleks uranyl sulfat dialirkan melalui resin amberlite IRA-400 Cl. Variabel yang berpengaruh pada penyerapan $[\text{UO}_2(\text{SO}_4)_3]^{4-}$ oleh resin penukar anion amberlite IRA – 400 Cl adalah penentuan berat Na_2SO_4 , pH, dan waktu kontak. Pada reaksi pembentukan kompleks anion yang terbentuk hanya $[\text{UO}_2(\text{SO}_4)_3]^{4-}$, sedangkan yang lain masih berupa kation dalam limbah yang lolos dari kolom pada penyerapan dengan resin penukar anion.

Resin jenuh uranium tersebut kemudian diimobilisasi menggunakan polimer. polimer baik digunakan karena uranium merupakan radionuklida pemancar alfa dengan waktu paro yang panjang[5]

Karakterisasi dan kualitas hasil imobilisasi

Karakterisasi hasil imobilisasi limbah radioaktif dilakukan dengan mengukur uji densitas, kuat tekan dan pelindihannya. Uji kuat tekan digunakan untuk menentukan kekuatan tekan blok polimer - limbah dengan alat hidrolik tekan. Uji densitas digunakan untuk menentukan massa jenis blok polimer - limbah sedangkan uji pelindihan digunakan untuk menentukan laju pelindihan blok polimer - limbah dengan menentukan banyaknya radionuklida yang terlepas ke lingkungan dan dilakukan dengan alat *soxhlet*.

Kuat tekan blok polimer-limbah merupakan parameter penting untuk evaluasi benturan agar menjamin keselamatan penanganan, transportasi dan penyimpanan lestari yang sudah dibuat standar oleh IAEA.

Laju pelindihan yaitu lepasnya unsur kerangka polimer dan lepasnya sejumlah unsur limbah dari blok polimer-limbah. Kerusakan kerangka polimer limbah dan laju pelindihan dapat ditentukan dengan mengukur kehilangan

berat polimer limbah. Laju pelindihan dapat ditentukan dengan analisis unsur - unsur atau radionuklida dalam air pelindih dengan laju pelindihan dipercepat. Laju pelindihan dipercepat digunakan untuk penelitian jangka pendek yang meneliti pengaruh beberapa parameter dan mengevaluasi kualitas hasil imobilisasi. Pengujian ini menggunakan air bebas mineral pada suhu 100°C untuk mempercepat pelindihan dengan cara mengekstrak sampel dengan alat *soxhlet* selama 24 jam. Laju pelindihan ditentukan dengan menggunakan kehilangan berat sampel pada cm^2 hari. Pengujian laju pelindihan jangka panjang dilakukan menggunakan ukuran polimer limbah sesungguhnya dan simulasi kondisi lingkungan dalam penyimpanan lestari.

METODOLOGI

Bahan dan Alat

Bahan kimia yang digunakan adalah $[\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}]$, Na_2SO_4 , resin *amberlite* IRA – 400 Cl, *arsenazo* III dan polimer poliester

Peralatan yang digunakan adalah shaker, kolom resin, rangkaian *soxhlet* untuk uji lindih, pH meter, alat tekan hidrolik *carver*, spektrometer UV-Vis *Perkin Elmer Lambda 35*, *SeriFor*, neraca analitik dan alat – alat gelas laboratorium.

Tata Kerja

Pembuatan Limbah Simulasi

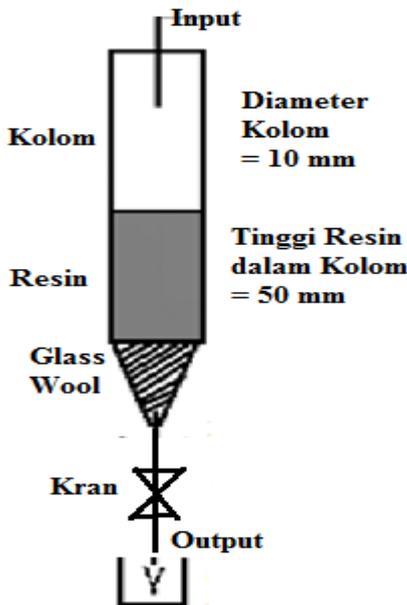
Limbah simulasi dibuat dengan cara melarutkan $[\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}]$ menjadi konsentrasi 50 mg/l.

Penentuan efisiensi optimum penyerapan

Penyerapan optimum dilakukan untuk menentukan efisiensi optimum dari penambahan Na_2SO_4 sebagai pengkompleks, pH dan waktu kontak.

Penyerapan uranium dalam kolom resin

Penyerapan limbah uranium cair dilakukan dalam kolom resin dengan laju alir 30 ml/jam. Proses penyerapan dalam kolom resin dapat dilihat pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Proses penyerapan limbah uranium cair dalam kolom resin

Imobilisasi resin dengan polimer

Imobilisasi resin anion amberlite IRA 400 - Cl dilakukan setelah mendapatkan penyerapan resin jenuh dalam proses alir pada kolom. Efisiensi yang didapat digunakan untuk perhitungan pembuatan resin jenuh. Imobilisasi dibuat dengan berbagai variasi *waste loading* (kandungan limbah) yaitu 10, 20, 30, 40 dan 50 %. Resin dan polimer dicampur pada masing - masing *waste loading* dalam cetakan *SeriForm*.

Uji Densitas

Uji densitas dilakukan dengan mencari volume blok polimer - limbah yaitu dengan mengukur tinggi dan diameter blok polimer - limbah dengan menggunakan jangka sorong. Selanjutnya blok polimer - limbah ditimbang hingga konstan. Densitas blok polimer-resin dihitung dengan persamaan 4 [6]

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (4)$$

Dimana ρ = densitas (gram/cm³), m = massa contoh (gram), v = volume contoh (cm³)

Uji Kuat Tekan

Blok polimer - limbah yang telah diukur densitasnya, dilakukan pengujian kuat tekan. Pengujian kuat tekan blok polimer - resin dilakukan dengan menggunakan alat tekan hidrolik *Carver* untuk menentukan kuat tekannya. Uji kuat tekan dilakukan untuk

menentukan kekuatan dari blok polimer - limbah. Nilai kuat tekan yang diukur didapat pada saat blok polimer - limbah mulai pecah. Kuat tekan blok polimer-limbah dihitung dengan persamaan 5 [6]

$$\sigma_c = \frac{P_{\max}}{A} \dots\dots\dots(5)$$

Dimana σ_c = kekuatan tekan (kN/cm²), P_{\max} = beban tekan maksimum (kN), A = luas penampang mula-mula (cm²). Uji tekan dilakukan dengan menggunakan alat *Carver Hydraulic Test* menggunakan prosedur ASTM C 39/C 39M-05[7]

Laju Pelindihan

Pengujian pelindihan dilakukan dengan menggunakan rangkaian alat *soxhlet*. Proses pelindihan dilakukan dengan mengisi air bebas mineral dalam labu didih dan diisi blok polimer - resin. Pemanasan dilakukan pada suhu 100°C selama 24 jam. Laju pelindihan menurut *Japan Industrial Standart* (JIS) dirumuskan dengan persamaan 6 [6]:

$$L = \frac{W_o - W}{S.t} \dots\dots\dots(6)$$

Dimana L = laju pelindihan (g cm²/hari), W_o = berat contoh sebelum dilindih (g), W = berat contoh sesudah dilindih (g), S = luas permukaan contoh (cm²/g), t = waktu pelindihan (hari)

Analisis Uranium dengan Spektrometer UV - VIS

Analisis uranium menggunakan pengkomplek arsenazo III 0,05 % pada pH 2 dan diukur dengan spektrometer pada panjang gelombang 650 nm.

HASIL DAN PEMBAHASAN

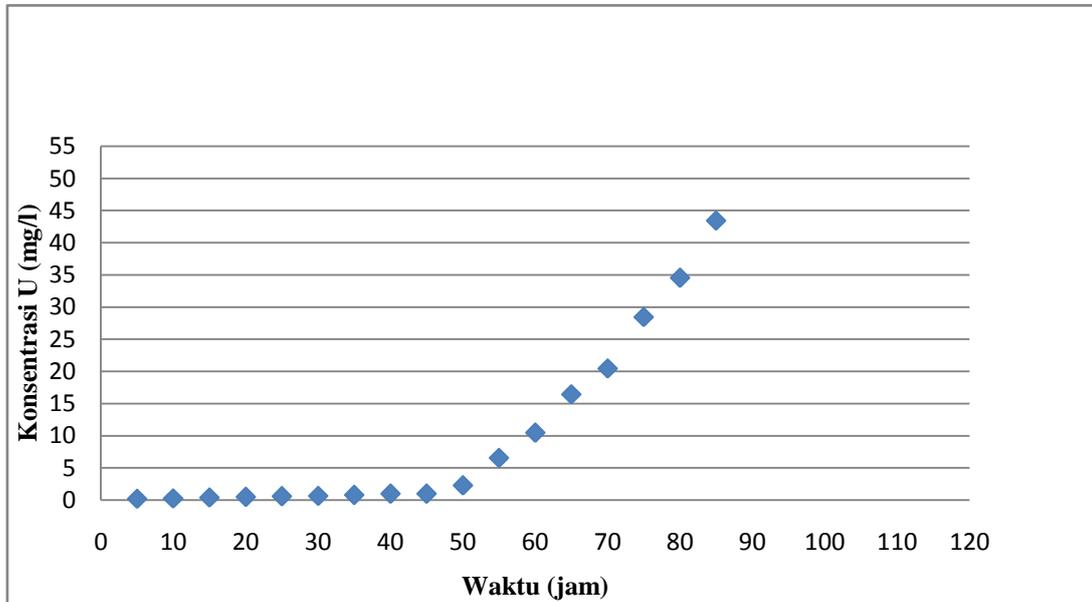
Kondisi optimum penyerapan uranium oleh resin dipengaruhi oleh komposisi umpan, pH, dan waktu kontak. Pada **Gambar 2** dapat dilihat bahwa, pada keadaan awal nuklida uranium yang melawati kolom resin terserap dengan baik. Hal ini terjadi karena adanya beda konsentrasi uranium dalam larutan dan resin, sehingga terjadi perpindahan uranium dari larutan ke resin sampai resin jenuh. Kondisi tersebut berlangsung sampai waktu operasi selama 45 jam.

Uranium yang terikat resin selama 45 jam adalah 66,190 mg.

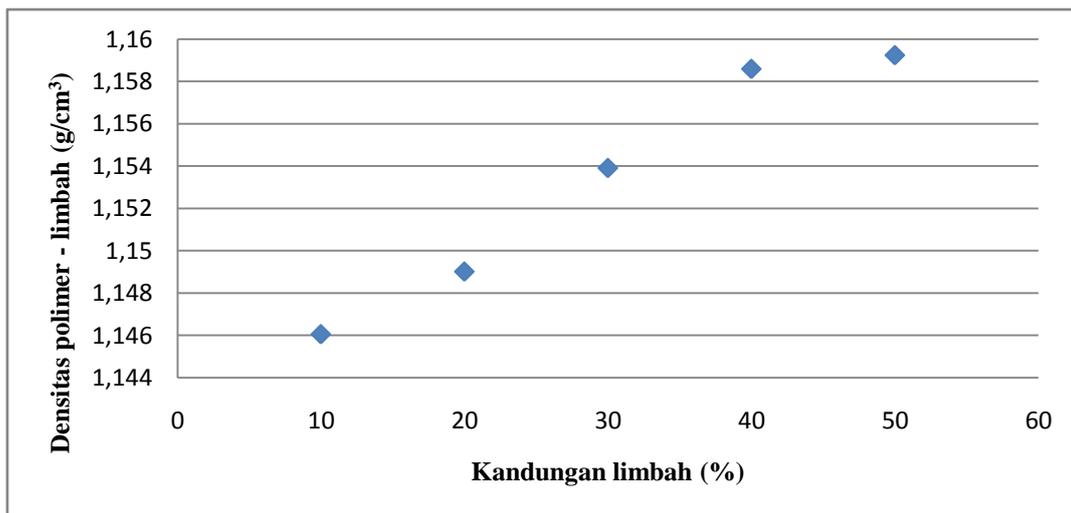
Densitas Polimer – Resin

Semakin besar kandungan polimer akan meningkatkan densitas karena massa jenis resin lebih besar dibanding dengan massa jenis

polimer. Peningkatan massa polimer – resin terjadi kerana banyaknya kandungan uranium dalam resin dari proses penjujukan dari pada unsur – unsur C dan H dalam polimer[8]. Hubungan antara kandungan limbah dengan densitas hasil imobilisasi polimer ditunjukkan pada **Gambar 3**.



Gambar 2. Konsentrasi uranium yang keluar dari kolom penukar ion berisi resin anion amberlite IRA 400 - Cl

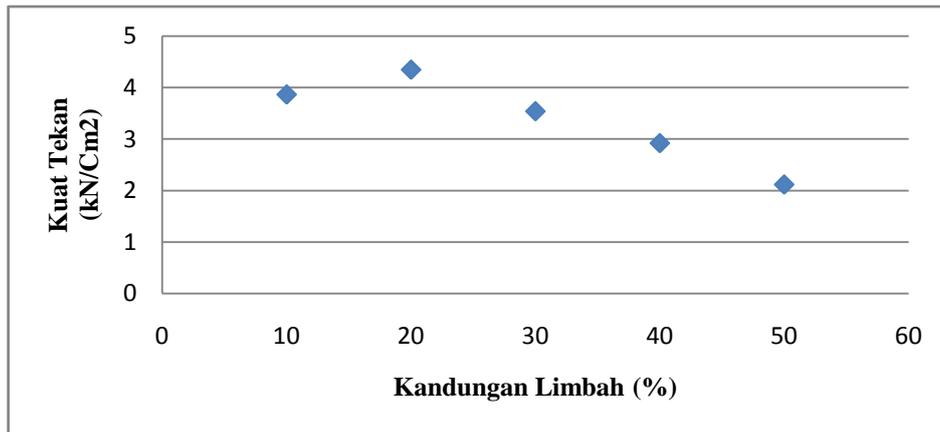


Gambar 3. Pengaruh kandungan limbah terhadap densitas polimer – resin

Kuat Tekan Polimer – Resin

Pada **Gambar 4** dapat dilihat bahwa kenaikan kuat tekan pada kandungan 20% merupakan komposisi yang baik hal ini disebabkan resin berperan sebagai pengisi dalam polimer sehingga dapat membentuk suatu bahan yang komposit [9]. Kuat tekan blok polimer

dengan kandungan 30 hingga 50% terus mengalami penurunan karena rantai polimer yang semakin pendek dan volume blok polimer – resin yang semakin besar maka tiap lapisan rantai polimer tidak cukup mengungkung limbah untuk memperkuat struktur, sehingga kekuatan tekanannya semakin menurun[10].

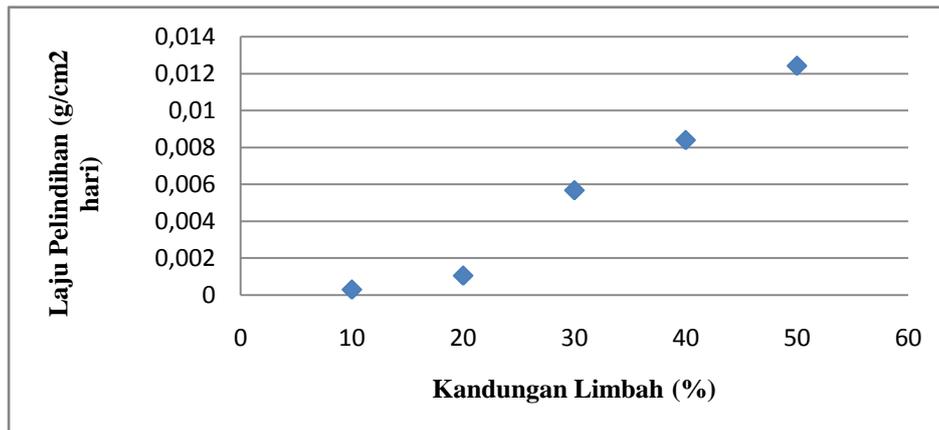


Gambar 4. Pengaruh kuat tekan hasil imobilisasi resin jenuh uranium menggunakan polimer dengan berbagai kandungan limbah

Laju Pelindihan Polimer –Resin

Dapat diketahui bahwa limbah yang terlindih terjadi setiap kandungan limbah. Pelindihan pada kandungan limbah 10 % sebesar $1,7 \times 10^{-4}$ g/cm².hari dan pelindihan terbesar terjadi pada kandungan limbah 50% sebesar $13,1 \times 10^{-3}$ g/cm².hari. Pelindihan uranium dari polimer resin terjadi karena difusi uranium dari dalam

polimer ke air pelindihan. Pada alat *soxhlet* pelindihan dilakukan pada 100⁰C, 1 atm. Laju pelindihan pada 100⁰C 1 atm sama dengan laju pelindihan pada suhu kamar selama satu tahun[11]. Pengaruh laju pelindihan polimer – resin dengan berbagai kandungan limbah dapat dilihat pada **Gambar 5**.



Gambar 5. Pengaruh laju pelindihan polimer – resin dengan berbagai kandungan limbah

KESIMPULAN

Pengolahan limbah uranium dengan pengkompleks Na₂SO₄ dapat diserap oleh resin anion amberlite IRA – 400 Cl menggunakan kolom dengan laju alir 30 ml/jam. Dimensi kolom resin yang digunakan adalah tinggi kolom 50 mm dan diameter kolom adalah 10 mm. Penyerapan optimal resin dalam kolom berlangsung sampai waktu operasi selama 45 jam. Imobilisasi resin bekas yang mengandung uranium jenuh dengan polimer didapatkan hasil

yang baik pada kandungan limbah 20%. Pada konsisi tersebut hasil imobilisasi polimer – resin dengan densitas sebesar 1,1490 g/cm³, kuat tekan 4,342kN/cm², dan laju pelindihan 0,0011 gram/cm².hari.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih kepada Bapak Herlan Martono yang telah membimbing penelitian ini dengan baik

DAFTAR PUSTAKA

1. Dwi luhur ibnu saputra, Herlan Martono, “ Penyerapan Uranium Cair Dengan Pengkompleks Natrium Sulfat Menggunakan Resin Penukar Anion”, Prosiding Nasional XVIII, Kimia Dalam Pembangunan, Jaringan Kerjasama Kimia Indonesia” ISSN 0854-4778, Tahun 2015
2. Wati, “Imobilisasi Limbah Cair Transuranium Simulasi Dari Instalasi Radiometarulgi dengan Polimer Poliester Tak Jenuh” Seminar Nasional V SDM Teknologi Nuklir Yogyakarta, ISSN 1978-0176, Yoyakarta, 2009
3. Martono Herlan, Thamzil Las, Ajeng Sartika, “ Resin Poliester Tak Jenuh Untuk Imobilisasi Resin Bekas Pengolahan Simulasi Limbah Radioaktif Cair” Jurnal Kimia Valensi Vol.2 No.1, ISSN : 1978 – 8193, November 2010
4. Solgy Mostafa, *Adsorption Of Uranium (Vi) From Sulphate Solutions Using Amberlite IRA – 402 Resin*, Equilibrium, kinetic and thermodynamics study, Journal annals of nuclear energy, 2014
5. Aisyah, Herlan Martono, Wati, “*Pengolahan Limbah Uranium Menggunakan Alumino Siliko Fosfat*”, Jurnal Zeolit Indonesia Vol.7 No.2, ISSN : 1411-6723, Bandung, 2008
6. Martono Herlan, *Pengolahan Limbah Aktivitas Tinggi Dan Transuranium, Pendidikan Dan Pelatihan Pengolahan Limbah Radioaktif*, BATAN, Serpong, 2010
7. Yuli Purwanto, Aisyah, ”Imobilisasi Alumino Siliko Phospat Jenuh Uranium Menggunakan Polimer Epoksi”, Prosiding Seminar Nasional Teknologi Pengelolaan Limbah IX, ISSN 1410-6086, Serpong 2010
8. Aisyah, “Pengolahan Limbah Produksi Radioisotop Menggunakan Resin”. Seminar Nasional V SDM Teknologi Nuklir, 2009
9. Wati, “Imobilisasi Limbah Cair Transuranium Simulasi Dari Instalasi Radiometarulgi dengan Polimer Poliester Tak Jenuh” Seminar Nasional V SDM Teknologi Nuklir Yogyakarta, ISSN 1978-0176, Yoyakarta, 2009
10. Aisyah, “Pengolahan Limbah Produksi Radioisotop Menggunakan Resin”. Seminar Nasional V SDM Teknologi Nuklir, 2009
11. Martono Herlan, “*Degradasi Termal Epoksi Akrilat dan Poliester Stiren yang mengandung limbah transuranium simulasi*”, Prosiding pertemuan dan presentasi ilmiah PPNY – BATAN, Yogyakarta, 1996

STUDI PEMANFAATAN ZEOLIT SEBAGAI BAHAN PENOPANG ASAM OKSALAT UNTUK DEKONTAMINASI PERMUKAAN ALUMINIUM

Sutoto

Pusat Teknologi Limbah Radioaktif-Badan Tenaga Nuklir Nasional
Kawasan Puspiptek Serpong Gedung 50, Tangerang Selatan, Banten 15310

ABSTRAK

STUDI PEMANFAATAN ZEOLIT SEBAGAI BAHAN PENOPANG OKSALAT UNTUK DEKONTAMINASI PERMUKAAN ALUMINIUM. Studi dekontaminasi permukaan plat aluminium telah dilakukan dengan serbuk zeolit bermuatan oksalat. Tujuannya adalah untuk mendekontaminasi permukaan peralatan aluminium berpresisi tinggi yang akan dipakai ulang (*reused*). Bahan pendekontaminasi zeolit bermuatan oksalat bervariasi konsentrasi dibuat dengan cara merendam sejumlah 20 g zeolit ke dalam larutan asam oksalat 25 ml berkonsentrasi masing-masing : 0,1 M, 0,2 M, 0,3 M, 0,4 M dan 0,5 M. Optimalisasi proses sorpsi oksalat kedalam zeolit ditentukan berdasarkan waktu perendaman selama 45 hari. Hasil perendaman dipisahkan dan kandungan oksalat tersisa dalam larutan dianalisis secara titrasi volumetri dengan larutan standar 0,1 N NaOH. Berbagai konsentrasi oksalat tersorpsi zeolit sebagai sampel bahan pendekontaminasi adalah 0,183 ; 0,282 ; 0,370 ; 0,567 ; 0,539 mmol/g. Selanjutnya dikeringkan dalam oven bertemperatur 110°C selama 3 jam. Pengujian dekontaminasi dengan zeolit-oksalat sebagai bahan pendekontaminasi dilakukan terhadap sampel permukaan plat aluminium berukuran (panjang x lebar x tebal) adalah (6,0 x 6,0 x 0,04) cm dengan penggosokan kontinyu menggunakan bantuan putaran pengaduk magnetik. Dekontaminasi dilakukan dengan waktu penggosokan selama 5 menit pada bervariasi kecepatan putaran 100; 200; 300 rpm. Permukaan sampel hasil dekontaminasi menjadi licin -cemerlang (*brightness*) dengan pengurangan berat relatif kecil. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa serbuk zeolit-oksalat dapat dipakai sebagai bahan pendekontaminasi permukaan logam aluminium dengan tingkat kerusakan permukaan relatif kecil.

Kata kunci : Zeolit, sorpsion, asam oksalat, dekontaminasi kimia-mekanika

ABSTRACT

UTILIZATION STUDY OF ZEOLYTE AS AN SUPPORTING MATERIALS OF OXALIC ACID COMPOUND FOR DECONTAMINATION PROCESS OF ALUMINIUM SURFACE. Decontamination study of aluminium surface by zeolite oxalic loaded was done. The objective is preparing of a decontamination method for high precision aluminium equipment made to reused propose without any lack and decreasing of their specification.

The loading was done by immersion of 20 g zeolyte into the 25 ml oxalic acid solution with various concentration of : 0,1 M, 0,2 M, 0,3 M, 0,4 M and 0,5 M during 45 days. After immersion process zeolite was separated by decanting and then the solution was analysed to determine the content of oxalic acid by volumetric method using solution standard of 0,1N NaOH and zeolyte was dried in the oven at 110°C for 3 hours. The result of oxalic acid in the zeolyte was 0,183 ; 0,282 ; 0,370 ; 0,567 ; 0,539 mmol/g. The decontamination experiments was done for aluminium pieces with dimension 6 cm x 6 cm and 0,4 mm thickness by brushing continuously using magnetic stirrer with rotation velocity are : 100 ; 200; 300 rpm for 5 minutes respectively. The brushing result is not yet significant to weight reduction of aluminium but shown a brightening of surfaces. It indicates that the zeolyte can be used for decontaminazer matterial and must be continued by experiments to find the optimazing of decontamination process.

Key word : zeolyte, sorption, oxalic acid, chemichal-mechanichal decontamination

PENDAHULUAN

Pengembangan metode dan teknologi dekontaminasi terus dilakukan untuk meningkatkan sistem keselamatan pengoperasian instalasi nuklir. Fasilitas laboratorium radiasi nuklir dengan berbagai jenis peralatan proses dan analisis yang berbahan aluminium banyak ditemukan. Kemungkinan permukaan peralatan tersebut tercemari zat radioaktif karena ketumpahan/tercipratan adalah besar. Akumulasi jumlah kontaminannya akan meningkatkan laju paparan radiasi diatas batas aman yang diperbolehkan. Keleluasaan gerak dan lama waktu pekerja beraktivitas berada di dalam

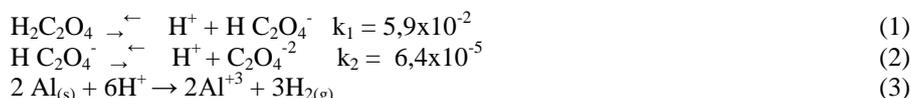
ruangan ditentukan untuk meminimalisir serapan dosis radiasi. Batasan serapan dosis radiasi tahunan untuk pekerja radiasi telah ditentukan oleh badan pengawas, yaitu 20 mSv/th dan tidak melebihi 100 mSv/5 th^[1]. Berkaitan hal tersebut diatas, maka keberadaan sumber radiasi yang berada di sekitarnya harus diminimalisir sehingga keselamatan pekerja aman.

Proses dekontaminasi sebagai salah satu upaya menurunkan tingkat laju radiasi dengan cara mengambil kontaminan (sumber radiasi) yang menempel di permukaan peralatan harus dilakukan. Yaitu, mengikis permukaan bahan/peralatan sehingga kontaminan yang menempel akan terlepas menjadi limbah

radioaktif. Proses dekontaminasi tersebut dapat dilakukan secara fisika- mekanikal atau secara kimia. Parameter efektivitas metode-teknologi dekontaminasi yang dipakai ditunjukkan dari besaran nilai faktor dekontaminasi (FD), disamping jumlah limbah sekunder yang dikeluarkan. Untuk mendapatkan metode yang tepat dengan FD besar, murah dan mudah dioperasikan, maka perlu dilakukan percobaan pengembangan teknologinya.

Dekontaminasi secara kimia adalah metode yang jangkauan efektivitas dekontaminasi nya (FD) besar, karena disamping berinteraksi langsung dengan zat kontaminan juga dapat berinteraksi secara kimia dengan logamnya dengan mekanisme reduksi-oksidasi (redoks). Akibat yang ditimbulkan adalah terkikisnya permukaan logam yang menyebabkan terlepasnya kontaminan yang ada. Jumlah limbah sekunder dan cara penangannya juga menjadi obyek litbang, salah satunya adalah dengan penggunaan bahan penopang sehingga cairan kimia pendekontaminasi dapat lebih lama berinteraksi dengan permukaan dan mudah pengambilannya kembali.

Zeolit sebagai mineral alam yang banyak ditemui di Indonesia adalah berkemampuan menukarkan ion dan menyerap senyawa kimia dengan batas maksimum yang tertentu. Pemakaian di sektor dekontaminasi dapat dilakukan dengan cara memuatkan



Percobaan dekontaminasi dengan zeolit alam yang dimuati oksalat dilakukan secara laboratorium di PTLR untuk mendekontaminasi logam aluminium. Variasi konsentrasi oksalat dilakukan untuk mengetahui kapasitas penyerapannya (sorpsi) dan untuk pengikisan mekanik dilakukan dengan cara penggosokkan menggunakan bantuan putaran pengaduk magnet. Hasil yang didapatkan adalah kesiapan metode dekontaminasi kimia-mekanikal menggunakan asam oksalat dengan bahan penopang zeolit untuk mendekontaminasi permukaan peralatan berbahan aluminium yang akan dipakai ulang. Pengadaan peralatan pengganti akan membutuhkan waktu dan biaya yang besar, sehingga tindakan dekontaminasi sangat diperlukan.

Tujuan penelitian ini adalah menambah variasi metode dekontaminasi peralatan berbahan aluminium dan logam-logam lunak yang akan dipakai ulang (*reused*). Kemudahan pelaksanaan *polishing* dekontaminasi dengan cepat dan sedikit menimbulkan limbah sekunder merupakan keunggulan metode yang dilakukan.

senyawa pendekontaminasi ke dalam bentonit dan selanjutnya dapat dipakai untuk tujuannya dengan keuntungan memudahkan pengelolaan selanjutnya. Salah satu senyawa pendekontaminasi kimia adalah asam lemah oksalat, yang dapat dimuatkan ke dalam bentonit. Zeolit yang telah dimuati dapat digosokkan secara mekanik sehingga kekerasan mineral akan mengikis permukaan logam. Bersamaan proses tersebut terjadi juga interaksi kimia kontaminan dengan asam oksalat yang berakibat proses dekontaminasinya meningkat. Pemakaian berbagai jenis pendekontaminasi berbasis asam sitrat dengan pengkondisi amonium oksalat dan hidrogen peroksida pada pH 5 telah memberikan hasil baik untuk mendekontaminasi logam *stainless steel* dengan FD sekitar 7.^[2] Penggunaan dengan pendekontaminasi asam oksalat untuk logam yang sejenis dengan cara perendaman dan menggunakan bahan penopang gel juga telah dilakukan dengan hasil optimal^[3]. Selanjutnya untuk melengkapi dan mengembangkan sistem dekontaminasi secara kimia yang ada, terutama untuk bahan aluminium maka perlu ditentukan metode yang optimal dengan hasil tidak merusak permukaan bahan. Asam-asam lemah dengan tingkat reduksi rendah dimungkinkan dapat mengikis permukaan aluminium secara lambat dan dapat terkontrol tingkat pengikisannya, reaksi pengikisannya terlihat pada persamaan 3.^[3,4,5]

Limbah seunder yang berupa serbuk zeolit terkontaminasi akan dapat mudah diolah secara sementasi mengikuti prosedur yang telah tersedia di fasilitas pengolahan limbah.

METODOLOGI

Bahan

Serbuk zeolit alam berukuran 100 mesh, larutan 1 M $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$, larutan 0,01 M NaOH, indikator Phenol Phtaline dan plat aluminium berukuran (panjang x lebar x tebal) = (6,0 x 6,0 x 0,04) cm

Peralatan

Peralatan laboratorium gelas, pengaduk magnet dengan bar magnetik jenis tabung (tube), timbangan analitis dan pemanas listrik (*oven*).

TATA KERJA

Bahan pendekontaminasi zeolit bermuatan oksalat dibuat dengan cara merendam serbuk zeolit kedalam larutan asam oksalat selama waktu yang ditentukan. Untuk percobaan

dibuat 5 buah sampel pendekontaminasi (zeolit-oksalat) dengan berbagai konsentrasi oksalat bervariasi. Proses pemuatan dilakukan dengan cara merendam 5 buah sampel zeolit berat masing-masing 20 g ke dalam larutan asam oksalat 25 ml berbagai variasi konsentrasi asam oksalat adalah : 0,1 M, 0,2 M, 0,3 M, 0,4 M dan 0,5 M selama 45 hari. Kapasitas pemuatannya ditentukan dengan menentukan kandungan oksalat tersisa dalam larutan secara volumetri menggunakan larutan standar 0,01 N NaOH, kemudian kandungan oksalat dalam zeolit adalah selisih oksalat semula dengan oksalat tersisa. Sebelum dipakai sebagai bahan pendekontaminasi, zeolit hasil pemuatan dikeringkan di dalam oven temperatur 110^oC selama 3 jam. Percobaan dekontaminasi dilakukan dengan cara menempatkan sejumlah zeolit-oksalat (pendekontaminasi) di atas permukaan plat, kemudian digosok-gosokan dengan arah melingkar menggunakan bantuan penggerak batang pengaduk magnet. Batang

pengaduk magnet dipasang dengan posisi *centris*, kemudian ditutup dengan cawan gelas. Proses pengikisan dilakukan dengan memutar pengaduk dengan kecepatan bervariasi dari 100. 200 dan 300 rpm, masing-masing selama 5 menit. Untuk mengetahui hasil pengikisan ditentukan dengan cara pengurangan berat plat sebelum dan sesudah pengikisan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada perlakuan pemuatan oksalat ke dalam zeolit alam, paska pengeringan teramati adanya perubahan warna dari kebiruan menjadi abu-abu. Perubahan tersebut sangat dimungkinkan dikarenakan adanya penguapan air dari serbuk zeolit. Mekanisme proses pemuatan oksalat ke dalam serbuk zeolit yang dilakukan secara perendaman selama 45 hari adalah proses sorpsi- pertukaran ion. Hasil pemuatan oksalat ke dalam serbuk zeolit sebagai bahan pendekontaminasi terlihat pada Tabel. 1

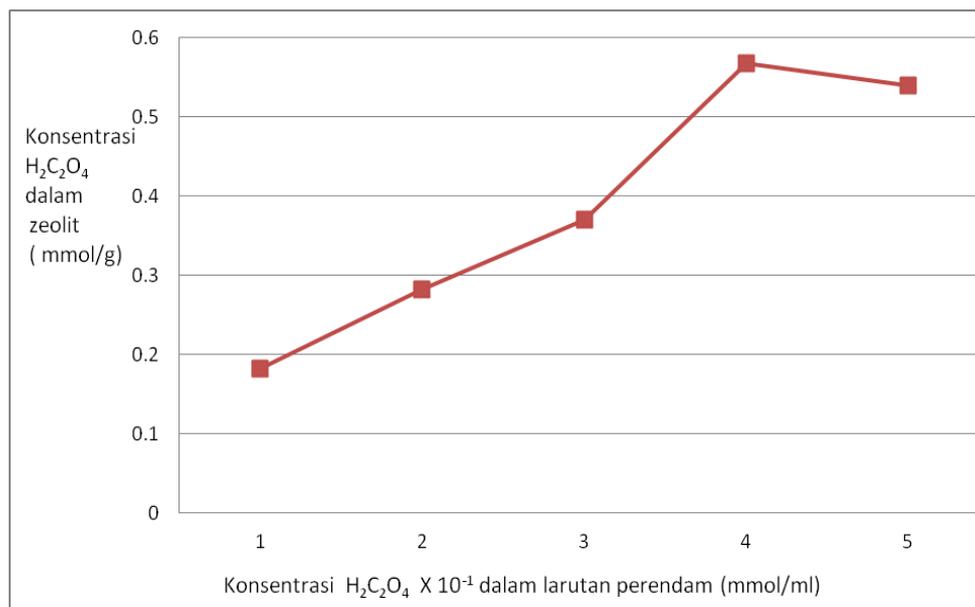
Tabel.1 Konsentrasi hasil pemuatan oksalat pada serbuk zeolit sebagai bahan Pendekontaminasi

No Sampel	Konsentrasi H ₂ C ₂ O ₄ perendam (mmol/ml)	Konsentrasi H ₂ C ₂ O ₄ dalam zeolit (mmol/g)
1	0,1	0.182
2	0,2	0.282
3	0,3	0.370
4	0,4	0.567
5	0,5	0.539

Dari Tabel 1 terlihat bahwa kapasitas penyerapan oksalat pada serbuk zeolit dengan retensi waktu perendaman 45 hari tergantung dari jumlah asam oksalat dalam larutan. Gambar. 1 menunjukkan pengaruh konsentrasi asam oksalat Kapasitas sorpsi oksalat ke dalam zeolit yang optimal didapatkan adalah 0,567 mmol/g.

Pada penggunaan percobaan dekontaminasi permukaan aluminium dengan bantuan penggosokan memakai *magnetic stirrer*, diamati tidak/belum terjadi pengurangan berat (pengikisan) yang *significant*. Keadaan tersebut dimungkinkan karena kurang besarnya gaya tekanan (*pressure force*) yang diberikan ke serbuk untuk berputar, sehingga belum mampu mengikis permukaan aluminium. Hasil akhir yang diperoleh adalah adanya perubahan warna permukaan aluminium menjadi cemerlang (*brigtmess*). Keadaan tersebut mengindikasikan bahwa telah terjadi gesekan (*abrasive*) antara

zeolit dengan bidang permukaan aluminium. Secara visual dapat diketahui bahwa proses dekontaminasi sudah berjalan tetapi belum optimal pengikisannya. Salah satu penyebab adalah kurang besarnya gaya penggosokan (gaya sentrifugal *magnetic stirrer*) yang dipakai untuk menggerakkan zeolit. Gaya sentrifugal penggosokan yang diberikan dari perputaran batang pengaduk terdistribusi mengarah ke vertikal dan horisontal. Gaya vertikal akan berdampak pada proses pemampatan, sedangkan gaya horisontal akan mengakibatkan proses pengikisan. Proses terjadinya *brigtmess* permukaan aluminium tanpa pengurangan berat adalah salah satu dampak dari permukaan mengalami *abrasive* dengan gaya relatif kecil. Proses pemampatan struktur bahan aluminium berjalan dan dimungkinkan terjadi peningkatan densitasnya.



Gambar. 1 Pengaruh konsentrasi asam oksalat

Peranan asam oksalat sebagai bahan pendekontaminasi dan pengkondisi bahan zeolit

Karakteristik permukaan butir serbuk zeolit bermuatan oksalat belum dilakukan secara mikroskopik, sehingga hasil interaksi *abrasive* aluminium tidak dapat terkuualifikasi. Perubahan berat sebelum dan sesudah dekontaminasi relatif sangat kecil. Perubahan yang dapat langsung teramati adalah permukaan plat aluminium menjadi cemerlang (*brightening*). Hasil tersebut terjadi dimungkinkan karena permukaan aluminium mengalami interaksi tekanan aliran (*stressing force*) dari pergerakan serbuk zeolit. Kekuatan daya tarik magnetik terhadap batang pengaduk (*bar magnetic*) yang diputar akan menekan permukaan aluminium, sehingga memungkinkan terjadinya proses pemampatan tebal aluminium menjadi lebih kecil. Panas yang dihasilkan selama interaksi kedua permukaan aluminium dan zeolit berinteraksi memasok proses pemampatan terjadi. Besarnya porositas aluminium dan besaran daya hantar panasnya merupakan parameter yang mengakibatkan kecepatan proses pengikisan terjadi. Sangat dimungkinkan laju dekontaminasi akan didapatkan dengan perlakuan meningkatkan kecepatan putaran dan waktu penggosokannya. Untuk kesempurnaannya dibutuhkan analisis uji kekerasan dan pengukuran densitas zeolit termuati oksalat. Semakin tinggi tingkat kekerasan serbuk (*hardness*), akan semakin baik dipakai sebagai pendekontaminasi. Sedangkan untuk optimalisasi dekontaminasi secara kimia perlu ditelusuri pada kondisi basah. Peran asam

oksalat sebagai asam lemah dan pembangkit reduktor, ion hidrogen (H^+) hanya dapat terjadi dalam media larutan. Percobaan oleh pengaruh penambahan air sebagai pelarut dan media terjadinya proses kesetimbangan kimia perlu dilakukan. Timbulnya panas akibat proses *friction* juga dapat mempengaruhi reaktivitas asam oksalat.

KESIMPULAN

Zeolit alam dari pasaran lokal bersifat *sorbent* dan mampu mengikat (dimuati) oleh gugus oksalat yang dapat berfungsi sebagai bahan pendekontaminasi permukaan logam aluminium. Kekerasan mineral zeolit relatif rendah sehingga nilai faktor pengikisannya rendah dan dapat meningkat setelah dimuati gugus oksalat yang akan bereaksi asam terhadap aluminium. Limbah sekunder zeolit terkontaminasi relatif mudah pengelolaannya dan dapat diolah secara sementara.

DAFTAR PUSTAKA

1. BAPETEN, " Proteksi dan Keselamatan Radiasi Nuklir dalam Pemanfaatan Tenaga Nuklir" Perka Kepala Bapeten No.4 Tahun 2013.
2. MULYONO DARYOKO," *Dekontaminasi Permukaan Baja Tahan Karat Dengan Metoda Kimia Berbasis Asam Sitrat*" Prosiding Seminar Nasional Pengelolaan Limbah VIII, PTLR-BATAN, 2010

3. SALIMIN ZAINUS," *Dekontaminasi Glove Box Dengan Asam Oksalat dan Bahan Penopang Gel*" Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Pengolahan Limbah I, Serpong 10-11 Desember 1997
4. WILLIAM F. SMITH, "*Principles of Materials Science And Engineering*" McGraw- Hill, Inc, International Edition, USA, 1996
5. KHOPKAR S. M, "*Konsep Dasar Kimia Analitik*" Penerbit Universitas Indonesia, Jakarta, 1999

KARAKTERISTIK LIMBAH RADIOAKTIF TINGKAT RENDAH DAN SEDANG DARI REAKTOR DAYA EKSPERIMENTAL HTR-10

Kuat Heriyanto

Pusat Teknologi Limbah Radioaktif-Badan Tenaga Nuklir Nasional
Kawasan Puspiptek Serpong Gedung 50, Tangerang Selatan, Banten 15310
Email: kuat@batan.go.id

ABSTRAK

KARAKTERISTIK LIMBAH RADIOAKTIF TINGKAT RENDAH DAN SEDANG DARI REAKTOR DAYA EKSPERIMENTAL HTR-10. Telah dilakukan kajian tentang karakteristik limbah radioaktif tingkat rendah dan sedang yang berasal dari reaktor daya eksperimental tipe HTR-10. Karakteristik limbah perlu diketahui untuk menentukan metode pengolahannya. Kajian dilakukan dengan mempelajari sistem operasi reaktor dari pustaka dan perhitungan. Diperoleh hasil karakteristik limbah radioaktif padat tingkat rendah antara lain: debu, karbonaktif, filterbekas dan limbah padat terkontaminasi dengan radionuklida I-131, I-132, I-133, I-134, I-135, C-14, Kr-85, Kr-87, Kr-88, Xe-133, Xe-135, Cs-137 dan Sr-90, sedangkan yang berupa cair berasal dari sistem purifikasi dan laundry serta kegiatan dekontaminasi dengan jenis radionuklida antara lain: H-3, C-14, Cs-137, Sr-90. Pengoperasian reaktor tipe HTR-10, selain menimbulkan limbah Bahan Bakar Nuklir Bekas juga menimbulkan limbah cair dan padat. Diharapkan tulisan ini dapat dijadikan salah satu acuan pengelolaan limbah radioaktif rendah dan sedang reaktor HTR-10.

Kata kunci: Reaktor HTR, limbah radioaktif dan karakteristik

ABSTRACT

CHARACTERISTICS OF LOW-INTERMEDIATE LEVEL RADIOACTIVE WASTE OF POWER EXPERIMENTAL REACTOR HTR-10. A research on the characteristics of low-level radioactive waste and being experimental power reactor type HTR-10. Characteristics of waste need to know to determine the treatment methods. The research method to study the reactor operating system of the library and calculations. The characteristics result of low-level solid radioactive wastes is obtained, include: dust, activated carbon, filter former and solid waste contaminated with radionuclides I-131, I-132, I-133, I-134, I-135, C-14, Kr-85, Kr-87, Kr-88, Xe-133, Xe-135, Cs-137 and Sr-90, while in the form of liquid coming from purification system and laundry as well as with the type of radionuclide decontamination include: H-3, C-14, Cs-137, Sr-90. Operation type reactor HTR-10, in addition to causing the waste also poses Used Fuel liquid and solid wastes. It is hoped this article can be used as reference for the management of radioactive waste of low and medium reactor HTR-10.

Keywords: reactor, radioactive waste and characteristics

PENDAHULUAN

Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2015 tentang Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional (RPJMN) tahun 2015-2019 disebutkan bahwa di bidang energi akan dimulai pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN)[1]. Pepres tersebut menjadi dasar penyusunan Renstra BATAN 2015-2019 yang memprioritaskan pembangunan Reaktor Daya Eksperimen (RDE)[2]. RDE yang akan dibangun merupakan reaktor bertemperatur tinggi dengan pendingin gas dengan daya thermal 10MW (*High Temperature Reactor 10 MW thermal, HTR-10*)[3].

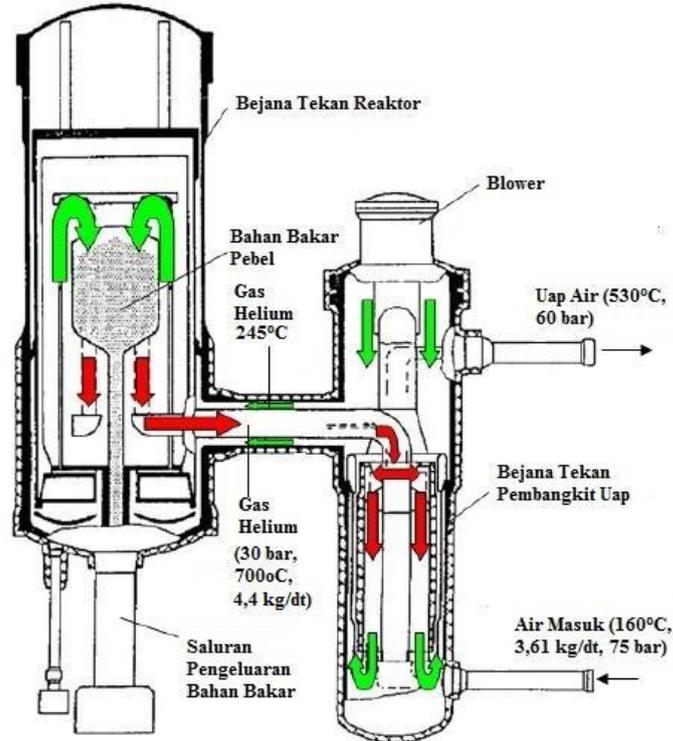
Reaktor Daya Eksperimental (RDE) tipe HTR-10 adalah reaktor dengan daya thermal 10 MW berpendingin helium (He) dengan tekanan 3 atm, berbahan bakar kernel UO₂ pengkayaan uranium 17% berat yang berlapis keramik

dengan moderator grafit. Gas helium yang digunakan sebagai pendingin mengandung pengotor yang terdiri dari CH₄ (≤ 1 ppm), uap H₂O (≤ 0.2 ppm), H₂ (≤ 3 ppm), CO (≤ 3 ppm), dan N₂ (≤ 1 ppm). Gambar 1 menunjukkan diagram pengaliran gas helium dari reaktor ke *steam-turbin* untuk pembangkitan steam, suhu gas helium masuk reaktor adalah 245°C dan keluar 700°C. Gas helium yang telah mengambil panas dari reaktor kemudian dialirkan ke *steam-turbin* untuk pembangkitan *steam*[4].

Pengelolaan limbah radioaktif merupakan bagian penting dari pengoperasian reaktor nuklir, oleh karena itu perlu dilakukan karakterisasi limbah radioaktif yang ditimbulkan dari pengoperasian RDE tipe HTR-10. Karakterisasi meliputi jenis unsur radioaktif dalam limbah, jenis dan jumlah limbah. Karakteristik limbah akan mempermudah dalam penanganan pengelolaan selanjutnya, sehingga dapat memberikan jaminan keselamatan bagi

pekerja dan masyarakat. Makalah ini akan menjelaskan karakteristik limbah padat dan cair yang ditimbulkan dari pengoperasian HTR-10. Diharapkan makalah ini dapat dijadikan salah satu acuan dalam pengelolaan limbah radioaktif cair dan padat yang ditimbulkan reaktor HTR-10. Unsur radioaktif didalam limbah terdiri dari unsur radioaktif hasil reaksi pembelahan dan elemen transuranium hasil aktivasi uranium dalam bahan bakar nuklir, unsur radioaktif yang

lain adalah tritium hasil aktivasi boron, litium, pengotor yang berupa CH_4 , uap H_2O , H_2 dalam pendingin helium. Tritium juga ditimbulkan dari hasil aktivasi He-3 yang terdapat didalam pendingin helium. Tritium juga dihasilkan dari hasil aktivasi pengotor boron dan litium dalam matriks bahan bakar HTR-10. Unsur radioaktif yang lain adalah C-14 hasil aktivasi pengotor pendingin helium yang berupa CO , dan N_2 [4].



Gambar 1. Skema reaktor HTR-10 dengan pendingin primer gas helium yang panasnya untuk pembangkitan uap air pada *steam-turbin* [5,6].

Sistem Purifikasi

Pada kondisi normal, 5% laju alir gas helium ($13 \text{ m}^3/\text{jam}$) dari sistem pendingin primer dimasukkan kedalam sistem purifikasi, selanjutnya gas helium hasil purifikasi dimasukkan kembali kedalam sistem pendingin primer. Gas helium tersebut pada awalnya melewati filter penghilang partikel debu, dan kemudian dilewatkan ke pemanas. Gas helium panas selanjutnya dilewatkan ke *converter* katalitis CuO untuk mengoksidasi CO menjadi CO_2 dan H_2 menjadi H_2O dengan penambahan gas O_2 . Gas helium keluar dari *converter* yang masih bersuhu tinggi selanjutnya dilewatkan ke pemanas untuk pemanasan gas helium hasil purifikasi sebelum dimasukkan kembali ke sistem pendingin primer. Gas helium yang keluar dari pemanas kemudian di lewatkan ke pendingin, gas tersebut didinginkan sampai kandungan uap airnya mengembun, selanjutnya

embunan uap air dipisahkan pada separator air. Gas helium yang keluar dari separator air kemudian dilewatkan ke *molecular sieve* untuk pengambilan partikel yang berukuran kecil. Gas helium yang keluar dari *molecular sieve* yang masih panas selanjutnya digunakan sebagai fluida pemanas pada pemanas untuk pemanasan gas helium hasil purifikasi. Gas tersebut selanjutnya dilewatkan ke kondensor yang berpendingin nitrogen cair untuk pengembunan uap airnya, kemudian gas helium dilewatkan ke filter karbon aktif untuk pengikatan gas I-131 , C-14 , Xe-133 , dan Kr-85 . Gas helium yang keluar dari filter merupakan gas helium hasil purifikasi.

Pada kondisi kegagalan operasi, kegiatan perawatan, atau regenerasi sistem, gas helium pada awalnya akan melewati berturut-turut filter, pendingin, dan separator air. Gas helium yang keluar dari separator air selanjutnya diolah seperti rangkaian alat proses pada Unit Pertama yang juga tersedia pada Unit Kedua.

Pada kegiatan purifikasi gas helium dapat menimbulkan limbah radioaktif padat berupa filter penangkap debu dan karbon aktif yang terkontaminasi oleh I-131, I-132, I-133, I-134, I-135, C-14, Kr-85, Kr-87, Kr-88, Xe-133, dan Xe-135. Kegiatan purifikasi tersebut juga menimbulkan limbah radioaktif cair berupa air yang terkontaminasi oleh H-3, C-14, Cs-137, dan Sr-90[7,8,9].

Sistem Ventilation and Air Conditioning(VAC) dan gas buang (Off Gas)

Gedung fasilitas RDE dilengkapi dengan sistem *Ventilation and Air Conditioning* (VAC) dan gas buang (*Off Gas*). Sistem VAC mempunyai lingkup suplai udara dan pengaturan tekanan negatif ruangan serta ekstraksi udara dari ruangan yang selanjutnya udara tersebut disaring dengan pre-filter jenis *glass fiber paper* untuk filtrasi pendahuluan dan kemudian disaring berturut-turut dengan filter carbon aktif dan *High Efficiency Particulate Air* (HEPA) filter. Sistem *Off Gas* mempunyai fungsi penarikan udara dari peralatan yang diindikasikan terdapat kontaminan kimia dan radioaktif yang kemudian udara tersebut diproses melalui dehumidifikasi, absorpsi, dan filtrasi, selanjutnya udara tersebut digabung dengan udara dari sistem VAC dan dilepas melalui cerobong. Dari sistem VAC dan *Off Gas* ditimbulkan limbah radioaktif padat yang berupa pre-filter, karbon aktif, dan HEPA filter, dan limbah radioaktif cair [7, 10, 11].

Potensi yang akan menjadi limbah padat dari pengoperasian reaktor RDE tipe HTR-10 antara lain debu grafit dari purifikasi gas helium yang tertangkap pada filter F-04 jenis *bagfilter*, pre-filter, filter karbon aktif bekas, padatan terkontaminasi dari kegiatan perawatan yang terdiri dari sarung tangan, kertas, kain dan pakaian kerja.

Sedangkan yang berpotensi menjadi limbah cair dari pengoperasian reaktor RDE tipe HTR-10 antara lain adalah: limbah cair dari sistem purifikasi gas helium, pencucian pakaian kerja (*laundry*), cairan kegiatan dekontaminasi, *shower* dan air pencucian. Limbah radioaktif cair dari sistem purifikasi gas helium mengandung H-3, Cs-137, Sr-90, dll, pada tingkat aktivitas rendah dan sedang diperkirakan sebanyak $2,5\text{m}^3/\text{th}$. Limbah radioaktif cair dari kegiatan *laundry*, dekontaminasi, *shower*, sistem VAC, dll, mempunyai tingkat aktivitas rendah diperkirakan sebanyak $15\text{m}^3/\text{th}$.

Pada Tabel 1 dan Tabel 2 terlihat bahwa suhu gas helium masuk dan keluar reaktor berturut-turut adalah $245\text{ }^\circ\text{C}$ dan $700\text{ }^\circ\text{C}$ [5,6]. Laju alir massa gas helium adalah $4,4\text{ kg/dt}$. Pada Tabel 2 diberikan data desain reaktor HTR-10, terlihat bahwa dalam pengoperasiannya temperatur air masuk dan keluar pada pembangkit uap mempunyai harga 160 dan $530\text{ }^\circ\text{C}$.

Tabel 1. Data Parameter Disain Utama Dari Reaktor HTR-10 [5,6]

Parameter desain yang penting	Unit	Jumlah
Energi termal	MW	10
Diameter teras reaktor	Cm	180
Tinggi teras rata-rata	Cm	200
Tekanan helium primer	Bar	30
Temperatur rata-rata helium pada lubang masuk/keluar reaktor	$^\circ\text{C}$	245 /700
Kecepatan alir massa helium pada energi penuh	kg dt^{-1}	4,4
Densitas energi rata-rata teras	MW m^{-3}	2
Faktor energi puncak		1,54
Jumlah batang kendali pada sisi reflector		10
Jumlah absorber bola pada sisi reflector		7
Bahan bakar nuklir	<i>Low Enrichment Uranium</i>	UO ₂ (LEU)
Jumlah logam berat dalam elemen bakar	g	5
Pengkayaan elemen bakar segar	%	17
Jumlah elemen bakar dalam teras		27.000
Manajemen bahan bakar	<i>Multi-pass</i>	<i>Continuous Re-Loading (MEDUL)</i>
Waktu rata-rata tinggal satu elemen bakar dalam teras	EFPD	1080

Tingkat energi maksimal elemen bakar	kW	0.57
Temperatur maksimal bahan bakar (operasi normal)	°C	919
Target <i>Burn up</i>	MWd tHM ⁻¹	80.000
Fluk termal maksimal dalam teras (E>1.86 eV)	n cm ⁻² dt ⁻¹	3,43×10 ¹³
Fluk cepat maksimal dalam teras (E>1 MeV)	n cm ⁻² dt ⁻¹	2,77×10 ¹³

Dari Tabel 2 ditunjukkan bahwa laju alir gas helium berharga 4,4 kg/dtk [5], densitas gas helium adalah 0,1769 g/L [4], maka laju alir volumetric gas helium adalah 25.000 L/dtk. Pada system purifikasi gas helium, laju alir gas helium adalah 5% dari laju alir utamanya. Kadar debu grafit dalam gas helium sebesar 0,125 mg/L, maka laju pembentukan debu adalah 25.000 L/dtk x 0,125mg/L x 5% atau sebesar 3125 kg/jam x 5%. Jumlah limbah padat debu grafit pertahun 156,25 kg/th (dibulatkan 160 kg/th). Filter F-04 jenis *bag filter* digunakan untuk menangkap debu grafit dalam kegiatan purifikasi gas helium. Jumlah filter bekas diperkirakan sebanyak 10m³/th, dan jumlah HEPA filter diperkirakan 0,2m³/th.

Umur ekonomis HEPA filter adalah 2-3th [13]. Limbah padat filter karbonaktif bekas adalah filter yang telah digunakan untuk penangkapan gas iodine, karbon, kripton, dan xenon. Total aktivitas I-131 yang dihasilkan pada akhir siklus reaktor

RDE tipe HTR-10 adalah 10¹⁶ Bq atau 2,7x10⁵ Ci, aktivitas spesifik I-131 adalah 1,2x10⁵ Ci/g maka jumlah I-131 adalah sebesar 2,25g. Karbon aktif mempunyai kapasitas penyerapan sebesar 1gI-131/kg karbon aktif [4, 12].

Jumlah karbon aktif yang diperlukan untuk menangkap 2,25 g I-131 adalah sebesar 2,25 kg. Bila efisiensi filtrasi dengan karbon aktif berharga 45% maka jumlah limbah karbon aktif pertahun adalah 2,25/0.45 atau sebesar 5 kg/th. Limbah padat terkontaminasi zat radioaktif dari kegiatan *maintenance* mempunyai jumlah 0,28 m³/tahun, yang merupakan limbah LRTR jenis tingkat sangat rendah. Dari system VAC-Off Gas ditimbulkan limbah radioaktif padat prefilter jenis *glass fiber paper*, karbon aktif, dan filter HEPA masing- masing sebanyak 10 m³/th, 5kg/th, dan 0,2m³/th

Tabel 2.Data disain reaktor HTR-10[6].

Bejana Tekan	
Tekanan Disain	40 bar
Tekanan Operasi	30 bar
Tinggi bejana tekan reaktor	10.8 m
Diameter dalam bejana tekan reaktor	4.5 m
Tinggi bejana tekan pembangkit uap	12.35 m
Diameter dalam bejana tekan pembangkit uap	1.5 m
Diameter dalam bejana tekan saluran gas	700 mm
Material	
Bejana tekan	20 MnMoNi 5 5
<i>Nozzle</i> utama uap air	X 20 CrMoV 121/10 CrMo 9 10
<i>Nozzle</i> air umpan	20 MnMoNi 5 5
Pembangkit uap	
Kapasitas transfer panas	10.5 MJ/dt
Laju alir massa pendingin primer	4.4 kg/dt
Temperatur masuk pendingin primer	700 °C
Temperatur keluar pendingin primer	245 °C
Tekanan masuk pendingin primer	30 bar
Temperatur air umpan	160 °C
Temperatur uap air	530 °C
Tekanan uap pada keluaran pembangkit uap	60 bar
Diameter luar <i>tube</i> dalam <i>tube bundle</i>	23 mm

Material	
Tube untuk pembangkit uap	X 10NiCrAlTi 32 20
Tube untuk air umpan	X 10NiCrAlTi 32 20
Tube untuk uap air	X 10NiCrAlTi 32 20
Blower gas primer	
Head statis total	1.5 bar
Saluran gas panas	
Diameter dalam pipa gas	225 mm
Diameter luar pipa penahan	500 mm
Tebal isolator fiber	100 mm
Material	
Pipa gas	X 10NiCrAlTi 32 20
Isolator	Material fiber Al ₂ O ₃

METODOLOGI

Karakteristik diperoleh melalui kajian komprehensif tentang potensi limbah yang ditimbulkan dari pengoperasian RDE tipe HTR-10. Pengumpulan data dan informasi dilakukan dengan mempelajari beberapa literatur yang ada tentang sistem operasi reaktor HTR-10.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Limbah Radioaktif Padat

Tabel 3 Menampilkan limbah padat yang ditimbulkan reaktor HTR-10. Pengoperasian reaktor HTR-10 menimbulkan limbah radioaktif padat, antara lain: berupa debu moderator grafit, karbon aktif bekas, filter bekas (*bag filter*), HEPA filter, drum filter, pebel moderator grafit, grafit (*carbon brick*), pre-filter, serta padatan terkontaminasi. Debu moderator grafit berasal dari purifikasi gas helium yang tertangkap pada filter. Sedangkan padatan terkontaminasi ditimbulkan dari kegiatan perawatan seperti sarung tangan, kertas, kain dan pakaian. Berdasarkan spesifikasi teknis (Tabel2) laju alir gas helium berharga 4,4 kg/dtk [5], densitas gas helium adalah 0,1769 g/L [13], maka laju alir volumetric gas helium adalah 25.000 L/dtk. Sistem purifikasi gas helium mempunyai laju alir 5% dari laju alir utamanya. Kadar debu grafit dalam gas helium sebesar 0,125 mg/L, maka diperoleh laju pembentukan debu adalah 25.000 L/dtk x 0,125 mg/L x 5% atau sebesar 3125 kg/jam x 5%. Jumlah limbah padat debu grafit pertahun 156,25 kg/th (dibulatkan 160 kg/th).

Filter F-04 jenis *bag filter* digunakan untuk menangkap debu grafit dalam kegiatan purifikasi gas helium. Jumlah filter bekas

diperkirakan sebanyak 10 m³/th, dan jumlah HEPA filter diperkirakan 0,2 m³/th. Umur ekonomis HEPA filter adalah 2-3 th [13]. Limbah padat filter karbon aktif bekas adalah filter yang telah digunakan untuk penangkapan gas iodine, karbon, kripton, dan xenon. Total aktivitas I-131 yang dihasilkan pada akhir siklus reaktor RDE tipe HTR-10 adalah 10¹⁶ Bq atau 2,7x10⁵ Ci, aktivitas spesifik I-131 adalah 1,2x10⁵ Ci/g maka jumlah I-131 adalah sebesar 2,25g. Karbon aktif mempunyai kapasitas penyerapan sebesar 1 g I-131/kg karbon aktif [13].

Jumlah karbon aktif yang diperlukan untuk menangkap 2,25 g I-131 adalah sebesar 2,25 kg. Bila efisiensi filtrasi dengan karbon aktif berharga 45% maka jumlah limbah karbon aktif pertahun adalah 2,25/ 0.45 atau sebesar 5 kg/th. Limbah padat terkontaminasi zat radioaktif dari kegiatan maintenance mempunyai jumlah 0,28 m³/tahun, yang merupakan limbah LRTR jenis tingkat sangat rendah. Dari system VAC-Off Gas ditimbulkan limbah radioaktif padat prefilter jenis *glass fiber paper*, karbon aktif, dan filter HEPA masing- masing sebanyak 10 m³/th, 5 kg/th, dan 0,2 m³/th.

Pebel moderator grafit yang mengalami kerusakan (gempil, retak, pecah, dll) diklasifikasikan sebagai limbah radioaktif padat tingkat sedang (LRTS) [10, 14, 15] . Jumlah limbah LRTS yang berupa pebel moderator grafit sebanyak 12.690 elemen per 3 tahun atau 4.230 elemen per tahun. Selain itu juga terdapat LRTS berupa grafit bekas dari *carbon brick* konstruksi sipil teras reaktor yang secara berkala (setiap 20 tahun) mengalami pergantian dengan jumlah 23,4 m³/20 th.

Tabel 3. Jenis dan jumlah limbah padat LRTR dari operasi HTR-10

No.	JenisLimbah	Klasifikasi limbah	JumlahLimbah	Kontaminan
1.	Debu moderator grafit	LRTR	160 kg/th	I-131, I-132, I-133, I-134, I-135, C-14, Kr-85, Kr-87, Kr-88, Xe-133, Xe-135.
2.	Karbon aktifbekas	LRTR	10 kg/th	I-131, I-132, I-133, I-134, I-135, C-14, Kr-85, Kr-87, Kr-88, Xe-133, Xe-135.
3.	Filter bekas jenis <i>bag filter</i>	LRTR	5 m ³ /th	I-131, I-132, I-133, I-134, I-135, C-14, Kr-85, Kr-87, Kr-88, Xe-133, Xe-135.
4.	Pre filter jenis <i>glass fiber paper</i>	LRTR	10 m ³ /th	I-131, I-132, I-133, I-134, I-135, C-14, Kr-85, Kr-87, Kr-88, Xe-133, Xe-135.
5.	HEPA filter bekas	LRTR	0,20 m ³ /th	I-131, C-14, dan hasil belah
6.	Limbah padat terkontaminasi dari operasional dan perawatan	LRTR	0,28 m ³ /th	Cs-137 dan Sr-90
7.	Drum filter	LRTR	5 m ³ /th	Cs-137 dan Sr-90
8.	Pebel moderator grafit	LRTS	4.230 elemen/th	Produk fisi dan aktivasi
9.	Grafit (<i>Carbon brick</i>)	LRTS	23,4 m ³ /20 th	Produk fisi dan aktivasi

Limbah Radioaktif Cair

Jenis dan jumlah limbah radioaktif cair dari pengoperasian reactor HTR-10 ditunjukkan pada Tabel 4. Limbah radioaktif cair yang ditimbulkan dari pengoperasian reaktor RDE terdiri dari limbah tingkat sedang dan rendah. Limbah tingkat sedang terdiri dari limbah cair dari sistem purifikasi gas helium, dekontaminasi, laboratorium, dan kebocoran sistem perpipaan. Limbah tingkat rendah terdiri dari limbah *laundry, shower*, dan air pencucian. Limbah radioaktif cair dari sistem

purifikasi gas helium mengandung H-3, Cs-137, Sr-90, dll, masuk pada kategori aktivitas tingkat sedang diperkirakan sebanyak 2,5 m³/tahun. Limbah radioaktif cair dari dekontaminasi, laboratorium, kebocoran sistem perpipaan mengandung Cs-137, Sr-90, dll, pada tingkat aktivitas sedang diperkirakan sebanyak 20 m³/minggu (840 m³/th). Sedangkan limbah cair dari *laundry, shower*, dan air pencucian mempunyai tingkat aktivitas sangat rendah yang pada umumnya dibawah batas nilai klirens, dan diperkirakan sebanyak 35 m³/minggu (1.470 m³/th).

Tabel 4. Limbah Radioaktif Cair LRTR dari Pengoperasian Reaktor HTR-10

No.	Jenis Limbah	Jumlah Limbah m ³ /tahun	Kontaminan
1.	Limbah cair dari sistem purifikasi gas helium	2,5	H-3, C-14, Cs-137, Sr-90, pada tingkat aktivitas sedang.
2.	Limbah radioaktif cair dari dekontaminasi, laboratorium, kebocoran sistem perpipaan	840	Cs-137, Sr-90, pada tingkat aktivitas sedang.
3.	Limbah radioaktif cair dari <i>laundry, shower</i> , dan air pencucian	1.470	Cs-137, Sr-90, pada tingkat aktivitas sangat rendah.

KESIMPULAN

1. Pengoperasian reaktor daya eksperimental tipe HTR-10 menimbulkan limbah radioaktif padat rendah serta limbah radioaktif cair tingkat rendah dan sedang.
2. Limbah padat antara lain berupa grafit moderator, karbon aktif, debu, filter dan benda terkontaminasi, dengan jenis Radionuklida yang dominan adalah: I-131, I-132, I-133, I-134, I-135, C-14, Kr-85, Kr-87, Kr-88, Xe-133 dan Xe-135.
3. Limbah cair antara lain berupa cairan dari system purifikasi, kegiatan dekontaminasi, laundry dan pencucian, dengan jenis Radionuklida yang dominan adalah H-3, C-14, Cs-137, Sr-90 dan Cs-137.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu dalam pembuatan makalah ini, antara lain : Kepala BTPPL, Prof. Ir. Zainus Salimin, M.Si, Drs. Gunandjar, SU, Ir. Mulyono Daryoko, SU, Ir. Aisyah, MT., Mirawaty, S.Si. dan Yuli Purwanto, A.Md., Serta pihak lain yang tidak dapat dicantumkan namanya pada makalah ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. Keputusan Presiden No. 5 Tahun 2000 Tentang Kebijakan Energi Nasional
2. Undang-undang No. 17 Tahun 2007 tentang Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional
3. Rencana Pembangunan Jangka Menengah BATAN 2015-2019, BATAN, 2014
4. Hyedong Jeong and Soon Heung Chang, "Estimation of the Fission Products, Actinides and Tritium of HTR-10", International Journal of Nuclear Engineering and Technology Vol 4 No 5. June 2009, 729-738, 2009.
5. Zongxin Wu, Dengcai Lin, Daxin Zhong, "The Design Features of The HTR-10", Nuclear Engineering and Design 218, Elsevier, 2002
6. BATAN-RENUKO, "Conceptual Design for General Design features of the RDE " RDE-DS-WBS02-01, Jakarta, September 2015.
7. BATAN-RENUKO, "Conceptual Design for Helium Purification Sistem/Helium Supporting Sistem", RDE-DS-WBS02-201-003, Jakarta, September 2015.
8. BATAN-RENUKO, "Helium Purification Scematic Diagram", RDE- DS-WBS02-201-003-002, Jakarta, September 2015.
9. BATAN-RENUKO, "Helium Supply and Storage Sistem KBB Scematic Diagram", RDE-DS-WBS02-201-003-003, Jakarta, September 2015.
10. Mohammad Dhandhang Purwadi, "Teknologi Reaktor Gas Temperatur Tinggi dan Limbahnya", Materi Workshop Pengelolaan Limbah HTR-10, PTLR-BATAN, Serpong, 18 September 2014
11. Sofiltra-Poelman, "Filter and Filter Equipment for Genaral Industry and Nuclear Industry", France, 1985.
12. BATAN-RENUKO, "Radioactive Waste Processing System", RDE-DS-WBS02-211, Jakarta, September 2015
13. Robert H Perry and Don Green, "Chemical Engineering Handbook", Mc Graw Hill, International Edition, 1984.
14. Andrew C., Kadak, Ph.D., "High Temperature Gas Reactors", Massachusetts Institute of Technology, 2011
15. Irson J, " Important Viewpoints Proposed for a Safety Approach of HTGR Reactions in Europe", International Proceeding ICENES, Belgia, 2005.

PENGEMBANGAN PENERAPAN SISTEM PENGAWASAN DALAM RANGKA PENCEGAHAN MASUKNYA SCRAP METAL TERKONTAMINASI ZAT RADIOAKTIF KE DALAM WILAYAH HUKUM REPUBLIK INDONESIA

Nanang Triagung Edi Hermawan

Direktorat Pengaturan Pengawasan Fasilitas Radiasi dan Zat Radioaktif

BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR

Jln. Gajah Mada No. 8 Jakarta Pusat

Email: n.triagung@bapeten.go.id

ABSTRAK

PENGEMBANGAN PENERAPAN SISTEM PENGAWASAN DALAM RANGKA PENCEGAHAN MASUKNYA SCRAP METAL TERKONTAMINASI ZAT RADIOAKTIF KE DALAM WILAYAH HUKUM REPUBLIK INDONESIA. Salah satu prinsip dasar dalam pengelolaan limbah radioaktif adalah mencegah masuknya limbah radioaktif dari negara lain ke dalam wilayah hukum Negara Republik Indonesia. Keberadaan fasilitas industri peleburan besi baja hingga saat ini masih mendatangkan sebagian besar bahan mentah berupa scrap metal dari luar negeri. Masuknya scrap metal yang terkontaminasi zat radioaktif dari luar negeri harus dicegah untuk melindungi keselamatan radiasi bagi pekerja, masyarakat umum, maupun kelestarian lingkungan hidup. Telah dilakukan studi pustaka untuk memperkuat kebijakan nasional dalam rangka mengantisipasi masuknya scrap metal terkontaminasi zat radioaktif ke dalam negeri. Kendali pencegahan harus dilakukan melalui dua pendekatan strategis secara simultan, meliputi strategi kendali teknis dan administratif. Kendali teknis dilakukan dengan mengoptimalkan peran serta fungsi peralatan deteksi radiasi yang telah terpasang di beberapa pintu masuk pelabuhan dan bandar udara. Adapun kendali administratif dilaksanakan dengan penerapan penyertaan salinan sertifikat pernyataan bebas kontaminasi zat radioaktif yang diterbitkan oleh badan pengawas negara asal scrap metal pada setiap proses importasi. Penerapan kendali teknis menghadapi keterbatasan sumber daya berupa, dana, personil, maupun sarana dan prasarana pendukung peralatan di pelabuhan dan bandar udara. Kendali administratif lebih efektif dan efisien untuk diterapkan di wilayah tanah air.

Kata Kunci : limbah radioaktif, scrap metal, kontaminasi zat radioaktif, peleburan besi baja.

ABSTRACT

THE DEVELOPMENT FOR IMPLEMENTING MONITORING SYSTEM TO PREVENT ENTRY OF SCRAP METAL CONTAMINATED RADIOACTIVE MATERIAL INTO THE REPUBLIC OF INDONESIA JURISDICTION. One of the basic principles in the management of radioactive waste is to prevent the entry of radioactive waste from other countries into the Republic of Indonesia jurisdiction. The existence of steel smelting industry facilities until today still get most of the raw material such as scrap metal from abroad. The entry of scrap metal that contaminated with radioactive material from abroad must be prevented in order to protect the safety of radiation to workers, the member of publics, as well as the environmental sustainability. A literature study has been done to strengthen the national policies in order to anticipate the entry of scrap metal contaminated with radioactive material into the country. Preventive control should be carried out through two strategic approaches simultaneously, covering technical and administrative control. Technical control is done by optimizing the role and function of the radiation detection equipment that has been installed in some of the entrance of seaports and airports. The administrative controls implemented by the copies application of radioactive contamination-free statement that issued by the regulatory body in the country of scrap metal origin in every importation process. The implementation of technical control is hampered by resources constraints, such as funds, personnel, also facilities and equipment in seaports and airports. An administrative control is more effective and efficient to be implemented in the territory of Indonesia.

Keywords :radioactive waste, scrap metal, radioactive material contamination, steel smelting.

PENDAHULUAN

Perkembangan industri berbasis logam di suatu negara membutuhkan keberadaan fasilitas peleburan logam, seperti industri peleburan besi baja. Produk hasil peleburan besi baja, baik berupa baja slab maupun baja billet, dipergunakan sebagai bahan dasar industri strategis, mulai dari industri konstruksi kapal, pipa, bangunan, konstruksi umum, kendaraan bermotor, kaleng, peralatan rumah tangga, senar

piano, mur dan baut, kawat baja, pegas, dan lain sebagainya.

Di samping diproduksi dari mineral bijih logam sebagai bahan mentah yang berasal dari alam, industri peleburan besi baja juga banyak memanfaatkan besi bekas (*scrap metal*). Hal ini dilakukan untuk menggunakan kembali ataupun mendaur ulang besi bekas dalam rangka penerapan prinsip *re-use* and *re-cycle* secara efektif, efisien, dan ekonomis.

Selain berasal dari dalam negeri, sebagian besar pasokan besi bekas untuk beberapa industri peleburan besi baja yang ada di tanah air justru berasal dari luar negeri. [1] Mengalirnya besi bekas dari luar negeri ke dalam negeri memerlukan pengawasan yang ketat untuk memastikan spesifikasinya tidak menimbulkan potensi bahaya yang dapat membahayakan kesehatan pekerja, anggota masyarakat sebagai konsumen produk akhir, maupun ancaman terhadap kelestarian lingkungan hidup.

Salah satu kemungkinan potensi bahaya yang menyertai besi bekas dari luar negeri sebagaimana diuraikan di atas adalah keberadaan kontaminasi zat radioaktif. Benda biasa yang terkontaminasi dengan zat radioaktif ataupun yang teraktivasi menjadi radioaktif dan sifat radioaktivitasnya tidak dapat digunakan lagi dikategorikan sebagai limbah radioaktif. [2] Dengan demikian, masuknya besi bekas terkontaminasi zat radioaktif dapat dipandang sebagai masuknya limbah radioaktif dari luar negeri ke dalam wilayah hukum negara kita.

International Atomic Energy Agency (IAEA) telah menetapkan dokumen *IAEA Fundamental Safety Principles* [3] sebagai acuan dasar dalam pemanfaatan tenaga nuklir, termasuk penggunaan zat radioaktif, untuk tujuan damai. Tujuan keselamatan mendasar dalam penggunaan zat radioaktif adalah melindungi pekerja, anggota masyarakat, serta kelestarian lingkungan hidup dari bahaya radiasi pengion pada semua kegiatan maupun fasilitas yang berpotensi meningkatkan risiko bahaya radiasi. Kegiatan dan fasilitas yang dimaksud juga melingkupi fasilitas peleburan besi baja yang menggunakan besi bekas.

Prinsip ke-7 dari dokumen IAEA *Fundamental Safety Principles* menyebutkan bahwa "*People and the environment, present and future, must be protected against radiation risks.*" Hal ini mengindikasikan potensi keberadaan besi bekas yang terkontaminasi zat radioaktif harus diantisipasi sedini mungkin, termasuk pada proses importasi besi tua yang berasal dari luar negeri.

Kebijakan nasional dalam pengelolaan limbah radioaktif di negara kita sebagaimana diatur di dalam Pasal 46 Peraturan Pemerintah Nomor 61 Tahun 2013 tentang Pengelolaan Limbah Radioaktif [4] menggariskan bahwa setiap orang atau badan dilarang memasukkan limbah radioaktif yang berasal dari luar negeri ke dalam wilayah hukum Negara Kesatuan Republik Indonesia. Hal ini dilakukan untuk melindungi keselamatan setiap warga negara maupun kelestarian lingkungan hidup, di samping guna menghindarkan wilayah negara kita menjadi tempat pembuangan limbah radioaktif dari negara lain.

Mekanisme importasi besi baja bekas sebagai bahan dasar industri peleburan besi baja berbeda dengan mekanisme importasi zat radioaktif. Importasi zat radioaktif diawasi secara ketat oleh Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN) melalui serangkaian sistem pengawasan, seperti penerapan izin impor dan persetujuan impor. Untuk memastikan importasi besi bekas bebas dari limbah radioaktif perlu dikembangkan sistem pengawasan terpadu dengan melibatkan setiap pemangku kepentingan yang terkait.

Kajian dalam rangka pengembangan sistem pengawasan untuk pencegahan masuknya besi bekas yang terkontaminasi zat radioaktif ini bertujuan untuk:

- a. mengidentifikasi potensi bahaya radiasi pada besi bekas yang terkontaminasi zat radioaktif;
- b. mengidentifikasi tantangan pengawasan importasi besi bekas yang terkontaminasi zat radioaktif; dan
- c. mengembangkan sistem pengawasan yang terpadu, efektif, dan efisien.

METODOLOGI

Kajian dalam rangka pengembangan penerapan sistem pengawasan untuk pencegahan masuknya besi bekas terkontaminasi zat radioaktif ke wilayah hukum Republik Indonesia ini dilakukan melalui studi pustaka terhadap beberapa standar internasional di bidang keselamatan radiasi yang diterbitkan oleh *International Atomic Energy Agency*. Tahapan yang dilalui meliputi proses pengumpulan literatur dan informasi pendukung, analisis, diskusi dan pembahasan, serta penyusunan laporan. Selain melingkupi kontaminasi permukaan oleh zat radioaktif berupa zat radioaktif terbuka, kajian juga mencakup kemungkinan keberadaan sumber bekas (*radioactive sources*) yang tercampur dalam besi bekas.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Keberadaan Besi Bekas

Scrap metal atau besi bekas banyak dipergunakan kembali dengan cara meleburnya untuk dijadikan bahan dasar berbagai industri berbasis logam. Proses tersebut banyak diterapkan di berbagai negara mengingat semakin terbatasnya sumber mineral bijih logam yang masih tersisa di alam. Besi bekas dapat berasal dari berbagai penggunaan peralatan logam. Sangat dimungkinkan pula besi bekas berasal dari peralatan penunjang yang dipergunakan pada fasilitas pemanfaatan zat radioaktif, baik pada proses pabrikasi, penggunaan, penelitian, maupun pengelolaan

limbah radioaktif. Dengan demikian sangat dimungkinkan adanya besi bekas yang terkontaminasi zat radioaktif ataupun teraktivasi menjadi radioaktif, dikenal sebagai *radioactive scrap metal*.

Pesatnya perkembangan industri berbasis logam di tanah air membutuhkan dukungan ketersediaan bahan baku yang juga terus meningkat. Bahan baku tersebut dapat berupa bijih mineral logam dan besi bekas. Semakin menipisnya cadangan mineral logam dan ketidakcukupan ketersediaan besi bekas dari dalam negeri mengharuskan dilakukannya importasi besi bekas dari luar negeri. Hal ini tentu menimbulkan potensi adanya besi bekas dari luar negeri yang terkontaminasi zat radioaktif dapat masuk ke siklus industri logam kita.

Besi bekas terkontaminasi zat radioaktif dapat berasal dari berbagai fasilitas maupun

kegiatan yang berkaitan dengan pemanfaatan zat radioaktif. Beberapa fasilitas atau kegiatan yang dimungkinkan menghasilkan besi bekas terkontaminasi, diantaranya [5]:

- pembongkaran atau dekomisioning fasilitas industri yang memproses bahan mentah mengandung radionuklida alam;
- dekomisioning instalasi nuklir dan fasilitas pendukungnya;
- pembongkaran fasilitas yang menggunakan zat radioaktif;
- keberadaan sumber radiasi yang hilang atau berpindah tangan secara ilegal;
- sumber radioaktif bekas yang sudah tidak digunakan lagi.

Beberapa contoh wujud besi bekas terkontaminasi zat radioaktif, termasuk sumber radioaktif bekas dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Beberapa contoh wujud besi bekas terkontaminasi zat radioaktif (*radioactive scrap metal*), termasuk sumber radioaktif bekas[6]

Bahaya Besi Bekas Terkontaminasi Zat Radioaktif

Keberadaan besi bekas yang terkontaminasi zat radioaktif di dalam fasilitas peleburan logam tentu saja berpotensi menimbulkan bahaya radiasi. Dalam hal keberadaan kontaminan ataupun zat radioaktif tidak diketahui pada saat bahan berbahaya tersebut masuk ke dalam siklus pengolahan ulang dan penggunaan, dampak bahayanya akan terjadi secara berantai. Pekerja yang menangani secara langsung, mulai pada saat pengangkutan, pembongkaran, peleburan, penanganan produk logam hasil peleburan di fasilitas industri peleburan logam sangat berpotensi menerima dosis radiasi yang melebihi batasan untuk masyarakat secara umum. Demikian halnya apabila logam hasil leburan diolah menjadi

berbagai produk peralatan logam, maka setiap pihak yang terlibat dalam proses produksi, pengangkutan, distribusi, bahkan hingga pihak konsumen akhir akan menerima dosis radiasi yang tidak perlu.

Apabila tidak tertangani dan terkendali dengan baik, potensi penerimaan dosis radiasi oleh berbagai pihak tersebut di atas dapat berkembang menjadi insiden atau kecelakaan radiasi. Kecelakaan radiasi bisa menyebabkan seseorang menerima dosis radiasi yang sangat tinggi dalam rentang waktu yang relatif singkat. Hal ini bisa menimbulkan gangguan kesehatan maupun kematian. Beberapa contoh insiden maupun kecelakaan radiasi di beberapa negara yang berkaitan dengan keberadaan besi bekas terkontaminasi zat radioaktif dapat dilihat dalam Tabel 1.

Tabel 1. Beberapa contoh kejadian kecelakaan radiasi berkaitan dengan *scrap metal* [7]

Lokasi kejadian	Peralatan	Sumber radioaktif	Penyebab	Dampak
Goiania, Brazil, 1987	Unit teleterapi	Cs-137 (50 TBq)	pengawasan yang lemah pencurian dari fasilitas peleburan scrap metal yang tidak aman	kontaminasi fasilitas 21 orang mendapat dosis di atas 1 Gy 4 orang meninggal pembongkaran bangunan 3.500 m ³ limbah radioaktif timbul
Istanbul, Turki, 1998	3 unit teleterapi	Co-60 (3,3 TBq; 23,5 TBq; 21,3 TBq)	pengawasan yang lemah jual-beli scrap metal	18 orang dirawat di rumah sakit 5 orang mendapat dosis sekitar 3 Gy 1 orang mendapat dosis sekitar 2 Gy lainnya dengan dosis di bawah 1 Gy hanya 2 sumber ditemukan
Samut Prakam, Thailand, 2000	Unit teleterapi	Co-60 (15,7 TBq)	pengawasan yang lemah pencurian dari fasilitas peleburan scrap metal yang tidak aman	10 orang mendapat dosis tinggi 3 orang meninggal sumber berhasil ditemukan
Nigeria, 2002	2 sumber well logging	Am-241/Be (721 GBq; 18 GBq)	pencurian dari truk perusahaan	Sumber terdeteksi dalam pengiriman kapal ke Eropa
Ciudad Juarez, Mexico, 1983	Unit teleterapi	Co-60 (37 GBq)	pengawasan yang lemah jual-beli besi bekas	kontaminasi baja bangunan 814 dibongkar 75 orang mendapat dosis antara 0,25 – 7 Gy beberapa fasilitas peleburan memerlukan dekontaminasi intensif 16.000 m ³ tanah & 4.5000 ton logam menjadi limbah radioaktif menghabiskan biaya ± US\$ 34 juta
Algeciras, Spanyol, 1998	Tidak diketahui	Cs-137	ketidaksengajaan saat peleburan	lepasan Cs-137 ke udara 6 orang terkontaminasi serius 270 ton debu terkontaminasi US\$ 20 juta utk kehilangan produksi US\$ 3 juta utk clean up US\$ 3 juta utk menyimpan limbah
Inggris, 2000	Alat pacu jantung	Pu-238 (140 GBq)	ketidaksengajaan saat peleburan tidak terdeteksi portal radiasi	dosis dapat diabaikan biaya utk clean up dan pembuangan menghabiskan beberapa juta dolar

Kejadian kecelakaan radiasi yang berkaitan dengan besi bekas terkontaminasi sebagaimana diuraikan dalam Tabel 1 menimbulkan kerugian, baik jiwa maupun material-finansial yang sangat besar. Dengan

demikian kejadian-kejadian tersebut menjadi pelajaran yang sangat penting dan sedapat mungkin harus dicegah agar tidak terulang kembali.

Besi bekas yang akan diolah atau dilebur kembali harus dipastikan tidak terkontaminasi zat radioaktif. Besi bekas terkontaminasi zat radioaktif dapat diolah atau dilebur kembali apabila konsentrasi aktivitas pada kontaminannya berada di bawah batasan aman yang telah ditetapkan. Batasan aman untuk

kontaminan berupa zat radioaktif alam (*radionuclides of natural origin*) yang ditetapkan oleh IAEA disajikan dalam Tabel 2. Adapun Tabel 3 menyajikan batasan aman untuk kontaminan zat radioaktif buatan (*radionuclides of artificial origin*) dalam jumlah sangat besar (*bulk material*).

Tabel 2. Batasan aman kontaminan zat radioaktif alam pada besi bekas [7]

Radionuklida	Konsentrasi aktivitas (Bq/g)
K-40	10
Radionuklida alam lain	1

Tabel 3. Batasan aman kontaminan zat radioaktif buatan pada besi bekas [7]

Radionuklida	Konsentrasi aktivitas (Bq/g)
Am-241, Ag-110m, Co-60, Cs-137, Pu-239, Zn-65	0,1
Cm-244, Ir-192, Nb-95, Sr-90, Tc-99, Tl-204, Zr-95	1
Au-198	10
Ni-63	100
Pm-147	1.000

Dalam hal besi bekas yang dimaksud merupakan sumber radiasi, baik berupa zat radioaktif terbungkus maupun terbuka, maka aktivitas atau konsentrasi aktivitasnya harus berada di bawah tingkat klierens. Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 16 Tahun 2012 tentang Tingkat Klierens [8] menjadi acuan untuk memastikan tingkat kontaminasi zat radioaktif pada besi bekas dianggap tidak membahayakan.

Tantangan Pengawasan Importasi Besi Bekas

Indonesia merupakan wilayah negara kepulauan yang sangat luas. Importasi besi bekas biasanya dilakukan dengan moda angkutan laut melalui beberapa pelabuhan yang ada. Meskipun telah ditetapkan banyak pelabuhan resmi sebagai pintu masuk besi bekas dari luar negeri, namun sangat dimungkinkan terjadinya penyelundupan melalui pintu masuk yang tidak resmi. Hal ini merupakan tantangan yang harus dihadapi dengan strategi pengawasan yang tepat dan berdaya guna.

Upaya pengawasan importasi besi bekas dalam rangka pencegahan dan pengendalian masuknya besi bekas terkontaminasi zat radioaktif tentu memerlukan infrastruktur pengawasan yang memadai. Dukungan pendanaan dalam rangka pengadaan sarana dan

prasarana, serta peralatan pendukung, pengadaan dan pelatihan personil, hingga pengembangan sistem pengawasan tentu membutuhkan anggaran yang tidak sedikit.

Di sisi lain, importasi besi bekas merupakan kegiatan importasi dalam rangka pengadaan bahan baku industri biasa yang pengawasannya bukan berada di tangan Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN). BAPETEN hanya memiliki kewenangan untuk melakukan pengawasan kegiatan importasi zat radioaktif melalui mekanisme penerbitan izin dan persetujuan impor zat radioaktif.

Sebatas kondisi yang ada hingga saat ini, tindakan pengawasan tersebut di atas baru bisa diterapkan di beberapa pelabuhan resmi sebagai pintu masuk yang resmi pula. Dengan demikian koordinasi dan kerja sama diantara para pemangku kepentingan dalam upaya pencegahan masuknya besi bekas yang terkontaminasi zat radioaktif ini harus terus dikembangkan dan ditingkatkan. Beberapa pihak terkait, meliputi antara lain BAPETEN, Badan Tenaga Nuklir Nasional, Ditjen Bea dan Cukai, Kementerian Perdagangan, Kementerian Perindustrian, Kementerian Kesehatan, Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, Angkatan Laut, Polisi Air, Badan Keamanan Laut, Otoritas Pengelola Pelabuhan, Kesyahbandaran, dan lainnya.

Pengembangan Sistem Pengawasan

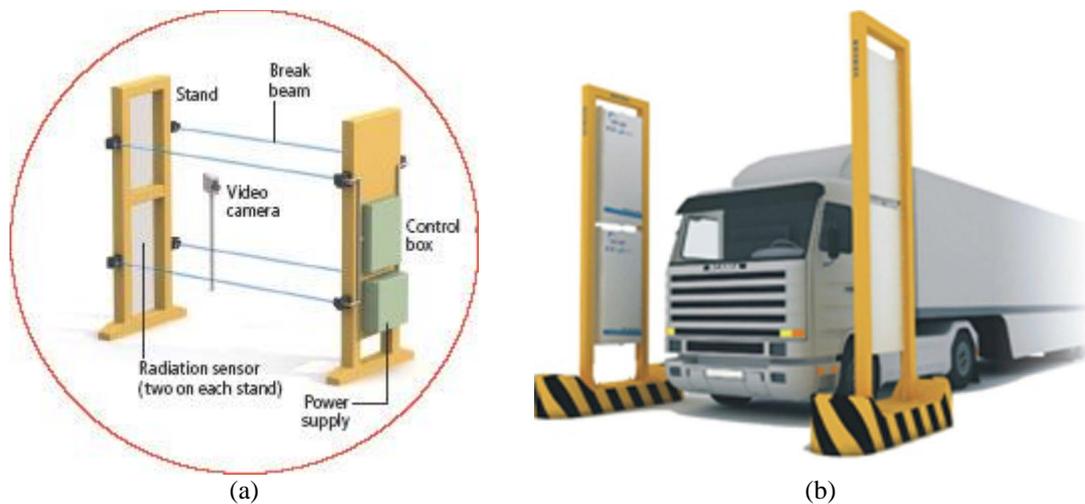
Pengawasan dalam rangka pencegahan dan pengendalian masuknya besi bekas terkontaminasi zat radioaktif dapat dikembangkan dengan penerapan kendali teknis dan administratif secara simultan.

a. Kendali Teknis

Kendali teknis dilakukan dengan melengkapi fasilitas pemeriksaan barang kiriman yang masuk ke pelabuhan dengan sarana dan prasarana pemantauan radiasi, dikenal sebagai *Radiation Portal Monitor* (RPM). Beberapa pelabuhan utama di tanah air, seperti pelabuhan Batam, Belawan, Tanjung Priok, Tanjung Perak, Makassar, dan Bitung telah dilengkapi dengan peralatan tersebut. Harus ditetapkan kebijakan

agar importasi semua besi bekas yang akan masuk ke dalam negeri hanya bisa dilakukan melewati pelabuhan-pelabuhan yang telah dilengkapi dengan RPM tersebut.

RPM merupakan perangkat peralatan untuk mendeteksi keberadaan zat radioaktif di dalam barang kiriman. Peralatan ini dapat dipergunakan untuk mendeteksi keberadaan kontainer besi bekas yang terkontaminasi zat radioaktif. Struktur utama peralatan RPM merupakan sepasang pilar yang dilengkapi dengan detektor radiasi gamma dan neutron sebagaimana ditampilkan pada Gambar 2. Apabila RPM mendeteksi adanya pancaran radiasi, maka sistem alarm akan berbunyi dan memberikan tanda di meja operator.



Gambar 2. Peralatan RPM di titik pemeriksaan barang kiriman [9]

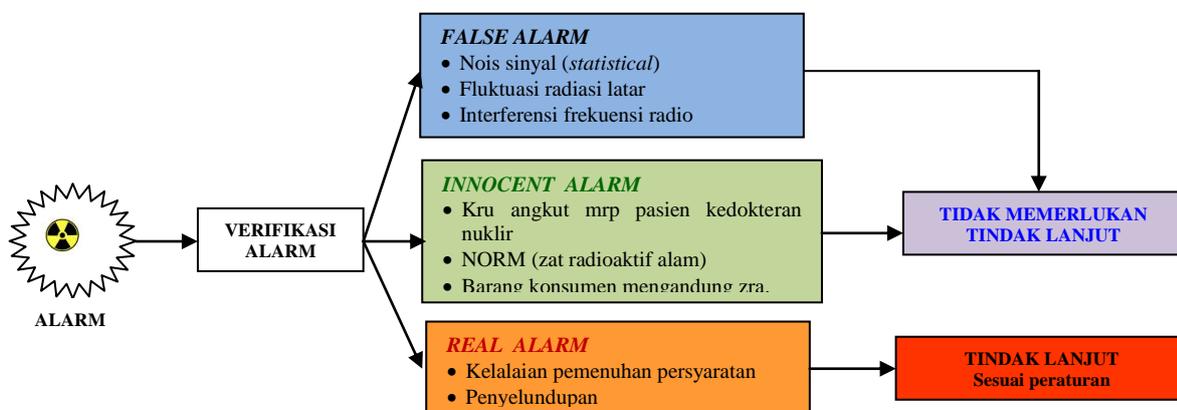
Dikarenakan sistem peralatan RPM hanya dilengkapi dengan detector radiasi gamma dan neutron, maka peralatan ini hanya menjadi alat pemeriksaan awal. Hal ini berkaitan erat dengan daya tembus radiasi gamma dan neutron yang lebih besar dibandingkan radiasi alpha dan beta. Keberadaan kontaminan zat radioaktif pemancar sinar alpha maupun beta pada besi bekas hanya dapat terdeteksi apabila proses peluruhan yang terjadi pada radionuklida yang bersangkutan disertai dengan pemancaran radiasi sekunder berupa sinar gamma. Dalam hal pemancaran sinar alpha atau beta tidak diikuti dengan radiasi sekunder, diperlukan pemeriksaan yang lebih teliti dengan mengambil sampel barang kiriman untuk dianalisis di laboratorium khusus.

Untuk melakukan pemeriksaan lebih lanjut guna mengetahui jenis radionuklida dalam kontainer berisi besi bekas yang diduga mengandung kontaminan zat radioaktif, perlu dilakukan pemeriksaan lanjutan menggunakan perlengkapan deteksi radiasi jinjing (*hand held detector*). Beberapa contoh peralatan *hand held detector* ditampilkan pada Gambar 3.

Dalam hal hasil pemeriksaan awal mengindikasikan adanya kemungkinan kontaminan zat radioaktif di dalam muatan besi bekas, maka tindak lanjut yang dilakukan harus mengacu prosedur kerja yang telah dibakukan. Salah satu prosedur tindak lanjut pemeriksaan yang dapat dikembangkan bisa mengacu langkah-langkah sebagaimana ditampilkan pada Gambar 4.



Gambar 3. Peralatan pengukuran radiasi dan pengidentifikasi radionuklida (*hand held*) [10]



Gambar 4. Tindak lanjut adanya hasil pengukuran radiasi (*alarm*) [9]

Selain peralatan dan prosedur kerja, penggunaan RPM juga membutuhkan sumber daya manusia yang berkompeten. Pendidikan dan pelatihan mengenai pengoperasian, perawatan, maupun perbaikan perlu dilakukan dengan melibatkan satuan-satuan gugus tugas terdepan, terutama Bea dan Cukai, otoritas bandara atau pelabuhan. Hal inilah yang seringkali menjadi kendala dalam pengoperasian perlengkapan RPM yang sudah terpasang di beberapa pelabuhan penting di tanah air.

b. Kendali Administratif

Dalam rangka mendukung pelaksanaan kendali teknis sebagaimana telah diuraikan dalam subbagian sebelumnya, perlu diterapkan pula kendali administratif dalam rangka pencegahan masuknya besi bekas terkontaminasi zat radioaktif pada proses importasi besi bekas dari luar negeri. Kendali administratif merupakan pemberlakuan persyaratan-persyaratan administratif berupa penyertaan dokumen-

dokumen pendukung yang diterbitkan oleh institusi yang berwenang sesuai peraturan perundang-undangan yang berlaku.

Dokumen-dokumen pendukung tersebut menjadi pegangan petugas kepabeanan untuk memastikan bahwa isi barang kiriman yang masuk kawasan kepabeanan benar-benar sebagaimana yang tertulis di dalam dokumen. Apabila dari pemeriksaan dokumen secara administratif petugas yang bersangkutan merasa kurang yakin, maka berdasarkan kewenangan yang dimilikinya ia dapat melakukan pemeriksaan langsung terhadap barang kiriman, termasuk membuka bungkusan, peti kemas maupun kontainer. Dengan demikian, secara prosedural pemeriksaan administratif lebih dikedepankan daripada pemeriksaan teknis.

Berkaitan dengan pencegahan masuknya besi bekas yang terkontaminasi zat radioaktif, secara kendali administratif beberapa negara telah menetapkan dilampirkannya sertifikat bebas kontaminasi zat radioaktif dari badan pengawas

atau otoritas resmi di negara asal besi bekas. Sertifikat ini harus menjadi satu kesatuan dengan dokumen pendukung importasi yang lainnya. Negara yang telah memberlakukan ketentuan ini diantaranya Amerika Serikat dan Pakistan. [5]

Pada saat besi bekas dipersiapkan untuk diangkut di negara asal, otoritas resmi di negara asal harus melakukan pengukuran laju paparan radiasi maupun tingkat kontaminasi zat radioaktif guna memastikan besi bekas yang akan diekspor bebas dari kontaminan zat radioaktif. Apabila hasil pengukuran mengindikasikan adanya kontaminan zat radioaktif, maka proses ekspor harus dihentikan. Besi bekas yang terkontaminasi zat radioaktif tersebut selanjutnya harus ditangani dan dikelola sebagai limbah radioaktif.

Sebaliknya, pihak kepabeanan di dalam negeri hanya dapat mengizinkan proses importasi berlanjut apabila importasi disertai dengan sertifikat bebas kontaminan zat radioaktif, meskipun bisa pula dilanjutkan dengan tahapan pemeriksaan fisik dengan RPM maupun *radiation hand held detector*. Adapun untuk proses importasi besi bekas yang tidak dilengkapi dengan sertifikat bebas kontaminan zat radioaktif, pihak kepabeanan hendaknya dapat bertindak tegas agar proses importasi tidak dapat dilanjutkan sampai dengan importer yang bersangkutan dapat menyertakan sertifikat dimaksud.

Dalam hal importer tetap tidak dapat menyertakan sertifikat bebas kontaminan zat radioaktif, maka kepabeanan harus memerintahkan importer untuk mengembalikan besi bekas ke negara asal. Selama proses menunggu pengembalian dilakukan, maka kontainer besi bekas harus ditempatkan di tempat yang aman dan terhindar dari akses lalu-lalang pihak-pihak yang tidak berkepentingan.

Di samping ditetapkan sebagai prosedur importasi baku atau diberlakukan sebagai peraturan perundang-undangan yang formal, pihak importer ataupun pengelola fasilitas peleburan logam besi bekas dapat menerapkan *best practice* penyertaan sertifikat bebas kontaminan zat radioaktif sebagai spesifikasi teknis barang impor yang dicantumkan di surat kontrak importasi. Selain itu, pihak-pihak terkait dapat pula mendorong ditetapkannya standar nasional mengenai spesifikasi besi bekas yang dapat diimpor dari luar negeri, termasuk parameter bebas kontaminan zat radioaktif.

Dengan segala keterbatasan sumber daya pengawasan, seperti ketersediaan RPM yang baru pada beberapa pelabuhan utama serta kekurangan personil yang berkompeten, kendali administratif bisa menjadi jawaban apabila kendali teknis tidak dapat sepenuhnya diterapkan secara optimal.

KESIMPULAN

Besi bekas merupakan komoditas strategis mendukung industri berbasis logam di dalam negeri. Proses importasi besi bekas berpeluang menjadi pintu masuknya limbah radioaktif berupa besi bekas yang terkontaminasi zat radioaktif. Keberadaan besi bekas yang terkontaminasi zat radioaktif berpotensi menimbulkan bahaya radiasi. Potensi bahaya tersebut bisa berkembang menjadi insiden atau kecelakaan radiasi yang sangat merugikan, bahkan bisa menimbulkan kematian. Tindakan pengawasan berupa upaya pencegahan dan pengendalian harus dilakukan di pelabuhan sebagai pintu masuk besi bekas dari luar negeri. Pengawasan dapat diterapkan dengan tindakan kendali teknis maupun administratif. Kendali teknis dilaksanakan dengan pemasangan RPM, perlengkapan detektor radiasi, serta pengembangan sistem pemeriksaan barang kiriman. Adapun kendali administratif dapat dilakukan dengan penyertaan sertifikat bebas kontaminan zat radioaktif sebagai bagian tidak terpisah dari dokumen importasi lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

1. PT Krakatau Steel. *Laporan Tahunan 2015: Efficiency for Sustainable Growth*, PT Krakatau Steel. Cilegon. (2015) 230.
2. BAPETEN. Undang-undang Nomor 10 Tahun 1997 tentang Ketenaganukliran. BAPETEN. Jakarta. (1997).
3. IAEA. *Fundamental Safety Principles*. IAEA-SF-1. Vienna. (2007).
4. BAPETEN. Peraturan Pemerintah Nomor 61 Tahun 2013 tentang Pengelolaan Limbah Radioaktif. BAPETEN. Jakarta. (2013).
5. UNECE. *Recommendations on Monitoring and Response Procedures for Radioactive Scrap Metal*. UNECE. Geneva. (2006).
6. USNRC. *Radioactive Scrap Metal Brochures*. NUREG/BR-0108.Rev1. USNRC. Washington. (2006)
7. IAEA. *Control of Orphan Sources and Other Radioactive Material in the Metal Recycling and Production Industries*. IAEA-SSG-17. IAEA. Vienna. (2012).
8. BAPETEN. Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 16 Tahun 2012 tentang Tingkat Klierens. BAPETEN. Jakarta. (2012).
9. Hermawan, N.T.E. Penggunaan RPM dalam rangka Mendukung Keamanan Nuklir Nasional. Prosiding Seminar

- Nasional Fisika 2014. UNJ. Jakarta.
(2014).
10. IAEA. *Improvement of Technical
Measures to Detect and Respond to*

*Illicit Trafficking of Nuclear and
Radioactive Materials.* IAEA TECDOC
1596. IAEA. Vienna. (2008).

PENGAWASAN ZIRKON DI INDONESIA

Moekhamad Alfiyan

Badan Pengawas Tenaga Nuklir

Email: m.alfiyan@bapeten.go.id

ABSTRAK

Sumber daya mineral zirkon banyak terdapat di Indonesia, khususnya di Kalimantan, Sumatera dan Bangka Belitung, sedangkan hasil olahan zirkon banyak dimanfaatkan oleh Industri di Pulau Jawa, antara lain: industri keramik, refraktori, dan pewarna. Zirkon merupakan material yang mendapat perhatian khusus oleh IAEA karena zirkon menyimpan potensi bahaya radiologik. Penyusunan makalah ini dimaksudkan untuk memberikan masukan pengembangan pengawasan keselamatan radiasi di industri zirkon. Makalah ini disusun berdasarkan data sekunder yang diperoleh dari: pelaksanaan kajian sebelumnya, IAEA, Kementerian Perindustrian, Kementerian Perdagangan dan pustaka ilmiah terkait mineral zirkon. Dari aspek radiologik, hasil kajian BAPETEN menunjukkan bahwa konsentrasi aktivitas radionuklida deret U dan Th dalam zirkon melampaui nilai batas yang membutuhkan pengawasan. Konsentrasi Aktivitas U-238 dan Th-232 di dalam Zirkon mencapai 3,08 Bq/g dan 1,04 Bq/g. Fakta tersebut sesuai dengan rekomendasi IAEA dalam dokumen SRS-51. Pengawasan keselamatan radiasi terhadap zirkon telah diakomodasi dalam Perka BAPETEN No 16 tahun 2013 tentang Keselamatan Radiasi dalam Penyimpanan *Technologically Enhanced Naturally Occuring Radioactive Material* (TENORM). Penghasil Zirkon dapat melakukan pengolahan terhadap zirkon menjadi produk lain dengan menyampaikan laporan kepada BAPETEN. Selain itu, pengawasan keselamatan radiasi terhadap zirkon juga memerlukan koordinasi antara BAPETEN dengan beberapa instansi terkait, antara lain: Kementerian ESDM, Kementerian Perdagangan, Kementerian Perindustrian dan Pemerintah Daerah sedemikian rupa sehingga dapat menjawab berbagai tantangan dan persoalan zirkon nasional, mewujudkan keselamatan radiasi terhadap pekerja, masyarakat dan lingkungan hidup, serta dapat meningkatkan produktivitas industri Zirkon di Indonesia.

Kata Kunci: Zirkon, Pengawasan Keselamatan Radiasi, BAPETEN

ABSTRACT

Zircon mineral resources are common in Indonesia, especially in Kalimantan, Sumatra and Bangka Belitung, while the processed zircon widely used by industry in Java, such as: industrial ceramics, refractories, and pigmen. Zircon is a material that considered by the IAEA because zircon contain radiological hazard. The preparation of this paper is intended to provide input in the development of regulatory control for radiation safety in zircon industry. This paper is based on secondary data from the previous studies, the IAEA, the Ministry of Industry, Ministry of Commerce and the scientific literature related to the mineral zircon. From the aspect of radiological, BAPETEN assessment results showed that the activity concentration of radionuclides series of U and Th in zircon exceeded limit values that require a control. Activity concentration of U-238 and Th-232 in Zircon reached 3.08 Bq /g and 1.04 Bq /g, respectively. The results in accordance with the document IAEA SRS-51. Radiation safety for zircon has been regulated in BCR No 16 year 2013 on Radiation Safety in Storage of Technologically Enhanced Naturally occurring Radioactive Material (TENORM). Zircon generator can perform the processing of zircon into other products through submit a report to BAPETEN. In addition, the safety regulatory of radiation on zircon also require coordination between BAPETEN with several agencies, such as: the Ministry of Energy and Mineral Resources, Ministry of Commerce, Ministry of Industry and Local Government in such a way so as to meet the challenges and problems zircon national, realizing the radiation safety of workers, society and the environment, and can increase industrial productivity Zircon in Indonesia

Key Words: Zircon, Radiation Safety Regulatory, BAPETEN

PENDAHULUAN

Sumber daya mineral zirkon yang di alam dalam bentuk pasir ($ZrSiO_4$) merupakan salah satu sumber daya mineral yang ditemukan di Indonesia. Pasir zirkon terhampar secara luas di wilayah Kalimantan Tengah dan Kalimantan Barat, dan banyak terdapat di Bangka Belitung sebagai endapan timah place. Mineral zirkon memang kurang populer dibandingkan batu bara ataupun minyak dan gas bumi yang telah banyak dikenal sebagai sumber energi andalan. Tanpa disadari, keberadaan pasir zirkon cukup berarti

dan tidak kalah pentingnya dengan mineral lain, baik bagi masyarakat setempat, industri maupun perekonomian nasional. Zirkon banyak digunakan di industri keramik, refraktori, pewarna karena zirkon mempunyai keistimewaan sifat kimia dan fisika dibandingkan bahan lain. Kelompok industri tersebut sangat banyak jumlahnya di Indonesia dan terus berkembang sehingga kebutuhan zirkon akan selalu bertahan atau bahkan meningkat. Maraknya industri yang memanfaatkan zirkon didunia mendorong eksploitasi zirkon secara besar-besaran, mulai dari penambangan berskala besar sampai dengan

penambangan rakyat. Sebagai upaya untuk melindungi zirkon nasional dari kelangkaan, maka pemerintah Indonesia mengatur kegiatan industri pertambangan zirkon. Usaha pemerintah tersebut dicerminkan dalam peraturan menteri energi dan sumber daya mineral No.7 Tahun 2012 tentang Peningkatan Nilai Tambah Mineral Melalui Kegiatan Pengolahan dan Pemurnian Mineral.

Terlepas dari permasalahan bisnis di atas, ternyata zirkon juga merupakan material yang mendapat perhatian khusus dari IAEA (*International Atomic Energy Agency*) /badan tenaga atom dunia. IAEA secara khusus menerbitkan dokumen mengenai zirkon, yaitu *Safety Report Series* (SRS. No. 51). Dokumen IAEA tersebut memuat dengan lengkap segala hal terkait material zirkon, termasuk pula keselamatan radiasi dan perkembangan pemanfaatannya di beberapa negara anggota IAEA. Perlu diketahui pula, zirkon memang erat dengan energi atom yang menjadi lingkup tugas IAEA karena zirkon banyak dimanfaatkan untuk industri nuklir. Zirkon banyak digunakan sebagai kelongsong bahan bakar reaktor nuklir karena zirkon mempunyai ketahanan termal yang sangat tinggi sehingga dapat menahan panas hasil reaksi fisi.

Potensi radiologik dalam pasir zirkon berhubungan dengan asal pasir zirkon yang merupakan material dari dalam bumi. Sumber radiasi alam tersebut di bidang ketenaganukliran dikenal dengan nama sumber radiasi primordial/terrestrial dengan jenis radionuklida yang terkandung adalah radionuklida dari deret Uranium dan Thorium. Tingkat radiologik pasir zirkon bergantung pada konsentrasi aktivitas radionuklida Uranium dan Thorium yang terkandung didalamnya. Kedua radionuklida merupakan sumber radiasi internal, yaitu sumber radiasi yang membahayakan bagi manusia apabila masuk kedalam tubuh melalui jalur pernafasan ataupun makanan. Umur paro kedua radionuklida tersebut sangat panjang, bisa mencapai ribuan juta tahun sehingga cenderung persisten. Waktu paro yang panjang merupakan variable penting lain selain tingkat konsentrasi aktivitas dalam memperkirakan potensi radiologik suatu material.

Sebagai negara anggota IAEA, Indonesia memiliki konsekuensi mempertimbangkan dan menerapkan rekomendasi yang ditetapkan oleh IAEA dengan tidak melupakan keselarasannya dengan perangkat hukum nasional. Dengan diterbitkannya rekomendasi internasional mengenai pemanfaatan zirkon, maka, dengan sendirinya segala bentuk kegiatan yang memanfaatkan zirkon wajib memperhatikan aspek keselamatan radiasi.

Makalah ini menyajikan aspek radiologik dalam pemanfaatan zirkon berikut pengawasan keselamatan radiasi yang diberlakukannya. Penyusunan makalah ini dimaksudkan untuk memberikan informasi kepada masyarakat, industri, akademisi, dll tentang potensi radiologik dalam pasir zirkon dan hasil olahannya serta kendali pengawasan keselamatan radiasi sebagai upaya mewujudkan keselamatan terhadap pekerja, masyarakat dan lingkungan hidup.

METODOLOGI

Makalah ini merupakan kajian pustaka terkait dokumen peraturan yang diterbitkan oleh IAEA, Kementerian Perindustrian, Kementerian Perdagangan, peraturan perundang-undangan nasional dan pustaka ilmiah lain terkait mineral zirkon. Melalui data-data tersebut dilakukan analisis untuk mendiskripsikan pengembangan pengawasan keselamatan radiasi terhadap industri zirkon di Indonesia secara terpadu, efektif dan efisien.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemanfaatan dan *Cash Flow* Zirkon Nasional

Pemanfaatan zirkon di Indonesia cukup berkembang di beberapa sektor industri, antara lain: industri keramik dan gelas PSZ (*Partially Stabilized Zirconia*), dan tepung zirkon (*micronized zircon*), kimia zirconium, bata tahan api (*refractory*) dan pasir cetak. Penggunaan *micronized zircon* dan bubuk zirkon dalam produk keramik hampir separuh dari konsumsi zirkon. Tepung zirkon pada keramik terutama berfungsi sebagai glasir opak (*opacifier glazes*) untuk keperluan rumah tangga (*table ware*) dan keramik ubin (*tile ceramic*). Dalam industri gelas, zirkonia (*fused zircon*) digunakan untuk menghasilkan gelas-gelas yang berkomposisi khusus, seperti gelas optik, gelas fiber, gelas TV berwarna, dan lain-lain. Zirkon banyak pula digunakan dalam industri logam untuk memanfaatkan sifat ketahanan panas yang baik dari zirkon. Tepung zirkon digunakan untuk melapisi logam (baja dan besi tuang), terutama dalam proses pelapisan secara kering untuk menghasilkan produk peralatan dapur dan kamar mandi, bata tahan api yang digunakan untuk melapisi tungku peleburan baja dan gelas dan AZ-abrasif (25% zirkonia), terutama digunakan dalam pengerjaan bahan-bahan yang berasal dari logam, seperti: steel billet, automotif, dan lain-lain. Di bidang ketenaganukliran, zirkon digunakan sebagai bahan kelongsong bahan bakar reaktor nuklir karena mampu menahan panas yang sangat tinggi dari reaksi fisi yang terjadi di dalam reaktor nuklir. Selain itu,

kandungan U-238 dan Th-232 dalam zirkon dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar reaktor nuklir.

Maraknya industri zirkon di Indonesia, baik industri hulu maupun hilir, sedikit banyak mempengaruhi distribusi zirkon masuk ataupun keluar dari Indonesia. Kebutuhan zirkon nasional sebagian dipenuhi oleh hasil tambang zirkon nasional dan sebagian lagi impor dari negara Malaysia, Australia, Italia, dll. Kebutuhan nasional yang relatif lebih rendah dibandingkan sumber daya mineral zirkon yang ada harus dipenuhi dari negara lain. Dengan kejadian tersebut, mengakibatkan terjadinya defisit nilai zirkon mencapai 4,5 kali. Perlu penelaahan mengapa banyak negara yang menerima impor zirkon dari Indonesia, apakah hanya zirkon yang diperlukan oleh negara asing (zirkon mengandung U-238 dan Th-232 yang berharga).

Peran Permen ESDM No. 7 Tahun 2012 tentang Peningkatan Nilai Tambah Mineral Melalui Kegiatan Pengolahan dan Pemurnian Mineral sangatlah penting untuk mengatasi masalah defisiensi nilai zirkon di atas. Kegiatan pengolahan dan pemurnian zirkon sebagai komoditas mineral non logam wajib memperhatikan hal berikut:

- a. memiliki sumber daya dan cadangan bijih dalam jumlah besar;
- b. untuk mendorong peningkatan kapasitas produksi logam di dalam negeri;
- c. teknologi pengolahan dan/ atau pemurnian sudah pada tahap teruji;
- d. produk akhir pengolahan dan/atau pemurnian sebagaibahan baku industri untuk kebutuhan dalam negeri;

- e. produk akhir sampingan hasil pengolahan dan/ ataupun pemurnian untuk bahan baku industri kimia dan pupuk dalam negeri;
- f. sebagai bahan baku industri strategis dalam negeri yang berbasis mineral;
- g. memberikan efek ganda baik secara ekonomi dan
 1. negara; dan/ atau
 - h. untuk meningkatkan penerimaan negara.

Parameter kelayakan pengolahan zirkon untuk diolah dan dimurnikan adalah batasan minimum pengolahan. Zirkon dapat diolah/dimurnikan jika kandungan $Zr+Hf > 99\%$. Disamping itu, Permen ESDM No. 7 Tahun 2012 juga telah menegaskan bahwa pengolahan zirkon wajib dilakukan di dalam negeri. Kebijakan tersebut untuk memblokir ekspor pasir zirkon yang sudah sering dilakukan investor asing dan penduduk setempat.

Aspek Radiologik Zirkon

Survei di pengolah pasir zirkon termasuk survei terhadap kelompok industri hulu. Perhatian awal ditujukan kepada industri hulu karena basis perkembangan zirkon terjadi dibagian hulu. Permasalahan di kelompok industri hilir juga dipengaruhi oleh industri hulu. Pemenuhan suplai zirkon untuk industri hilir sangat bergantung pada kesanggupan penambang/pengolah dalam memenuhi permintaan pengguna zirkon.

Hasil pengukuran laju paparan radiasi di beberapa fase proses produksi diberikan dalam Tabel 1. Berdasarkan hasil tersebut diketahui bahwa nilai laju paparan di semua fase produksi melampaui nilai batas *action level*, yaitu suatu indikator yang mengisyaratkan suatu material perlu penelaahan lebih lanjut atau tidak.

Tabel 1. Laju Paparan Radiasi Pasir Zirkon di Setiap Fase Produksi

	Laju Paparan Radiasi ($\mu\text{Sv}/\text{jam}$)	Kadar zirkon
Pasir zirkon	1,2	30-40%
Zirkon keluaran meja goyang	1,5	50%
Zirkon akhir	1,5	64%

Sumber: Laporan Hasil Kajian Efektivitas Operasional Pengawasan FRZR dan Proteksi Radiasi IBN

Laju paparan yang terukur belum bisa memproyeksikan potensi radiologik yang ditimbulkan oleh pasir zirkon terhadap manusia karena laju paparan menunjukkan besar paparan radiasi eksternal, sedangkan untuk radionuklida alam, potensi bahaya radiasi internal lebih penting dibandingkan radiasi eksternal. Bahaya radiasi internal akan terjadi jika radionuklida

masuk (*intake*) ke dalam tubuh melalui jalur pernafasan ataupun pencernaan. Efek radiasi internal dari zirkon sangat tinggi karena jenis nuklida yang dikandung adalah uranium dan thorium dengan umur paro mencapai ratusan juta tahun. Radionuklida yang masuk kedalam tubuh akan memberikan reaksi secara terus menerus selama masih terdeposit dalam tubuh.

Radionuklida akan hilang dari tubuh melalui dua kemungkinan, yaitu: bersamaan dengan ekskresi manusia atau mengalami peluruhan. Tingkat radiasi internal diindikasikan dengan mengukur konsentrasi aktivitas radionuklida dalam zirkon. Pengambilan sampel zirkon pada setiap fase

proses dilakukan untuk mengetahui perbedaan konsentrasi aktivitas U dan Th di dalam zirkon pada setiap fase proses. Hasil pengukuran konsentrasi aktivitas beberapa radionuklida dalam sampel zirkon ditampilkan dalam Tabel 2.

Tabel 2. Konsentrasi Aktivitas Radionuklida dalam Sampel Zirkon

Koensentrasi Aktivitas (Bq/Kg)			
	U-238	Ra-226	Th-232
Pasir zirkon	2703±605	3245±180	1042±897
Zirkon keluaran meja goyang	2738±569	3099±173	634±46
Zirkon akhir	3081±675	3177±178	540±43

Sumber: Laporan Hasil Kajian Efektivitas Operasional Pengawasan FRZR dan Proteksi Radiasi IBN

Hasil pengukuran konsentrasi aktivitas radionuklida di atas memenuhi hasil penelitian yang dilakukan oleh IAEA dalam dokumen SRS 51. Rata-rata zirkon mengandung konsentrasi aktivitas radionuklida deret U-238 dan Th-232 masing-masing pada kisaran 2-4 Bq/g dan 0,4-1 Bq/g, sedangkan dalam Zirkonia masing-masing pada kisaran 3-13 Bq/g dan 0,1-2,6 Bq/g. Berdasarkan data diatas pula, maka kita mengetahui bahwa konsentrasi aktivitas U-238 dan Ra-226 dalam semua sampel zirkon melampaui nilai batas pengawasan yang ditetapkan, baik oleh IAEA maupun peraturan perundang-undangan nasional. BAPETEN telah menetapkan bahwa radionuklida alam dibebaskan dari pengawasan apabila konsentarsi aktivitas radionuklida tersebut tidak lebih dari 1 Bq/gram. Justifikasi dapat diberikan bahwa zirkon merupakan material yang perlu perhatian untuk menjadi obyek pengawasan pemanfaatan tenaga nuklir.

Pengawasan Keselamatan Radiasi di Industri Zirkon

Pasir zirkon atau hasil olahannya merupakan bagian dari TENORM (*Technologically Enhanced Naturally Occuring Radioactive Material*), yaitu radionuklida alam yang mengalami peningkatan konsentrasi aktivitas akibat campur tangan teknologi atau kegiatan manusia. Radionuklida alam akan selalu dalam kondisi seimbang apabila tidak ada faktor lain. Pada keadaan seimbang tersebut, konsentrasi aktivitas setiap radionuklida anggota deret induk dan anaknya akan sama. Aktivitas manusia, semacam eksploitasi, akan mengakibatkan terangkatnya radionuklida ke permukaan dan mengalami perluasan permukaan sehingga radionuklida akan terkonsentrat. Demikian pula dengan pasir zirkon, yang akibat

kegiatan penambangan akan membawa U-238 ataupun Th-232 bersama-sama hasil tambang.

Persyaratan umum keselamatan radiasi dari IAEA, yaitu: GSR part 3 secara tidak langsung menjawab permasalahan pengawasan keselamatan radiasi untuk zirkon. Tinjauan keselamatan radiasi dalam GSR part 3 membedakan pengawasan berdasarkan situasi paparan yang terjadi, yaitu: *plan exposure*, *emergency exposure* dan *existing exposure*. *Plan exposure* (paparan yang sengaja direncanakan direncanakan, yang dalam pemahaman sebelumnya disebut sebagai *practice* atau pemanfaatan), *emergency exposure* (paparan darurat yang merupakan akibat kecelakaan) dan *existing exposure* (paparan yang telah ada) dalam pemahaman sebelumnya merupakan bagian dari intervensi (tindakan untuk menurunkan paparan). *Existing exposure* mencakup situasi paparan radiasi alam, paparan yang ditimbulkan oleh residu zat radioaktif pada masa lampau yang bukan bagian dari pengawasan dan paparan radiasi yang ditimbulkan sebagai sisa paparan darurat. Dengan demikian, NORM dan TENORM yang merupakan sumber radiasi alam pada umumnya dipertimbangkan sebagai *existing exposure*. Namun demikian, paragraf 3.4 GRS part 3 menyatakan bahwa persyaratan keselamatan yang relevan untuk *plan exposure* dapat diberlakukan untuk *existing exposure* apabila konsentrasi radioanuklida alam deret U dan Th melampaui 1 Bq/g serta konsentrasi aktivitas radionuklida K-40 melampaui 10 Bq/g.

Terminologi di atas memberikan kejelasan tindakan pengawasan terhadap zirkon atau kegiatan lain yang melibatkan radionuklida alam. Kegiatan yang melibatkan zirkon lebih tepat dianggap sebagai suatu pemanfaatan (*plan exposure*) yang harus memenuhi semua persyaratan pemanfaatan. Kegiatan yang

melibatkan zirkon dianggap sebagai suatu pemanfaatan atas dasar: karakteristik radiologik zirkon dan fungsi zirkon. IAEA telah memastikan bahwa konsentrasi aktivitas radionuklida dalam zirkon akan selalui melampaui 1 Bq/g dan dipandang tidak wajar ada tindakan untuk menurunkan keradioaktifan/ intervensi dari zirkon karena teknologi untuk mendisosiasi U dan Th dari ikatan zirkon masih sangat langka. Keberadaan zirkon berbeda dengan TENORM lainnya karena zirkon dihasilkan sebagai bahan baku suatu produk.

Secara nasional, pengaturan zirkon yang bersesuaian dengan GSR part 3 di atas adalah Perka BAPETEN No. 16 tahun 2013 tentang Keselamatan Radiasi dalam Penyimpanan *Technologically Enhanced Naturally Occuring Radioactive Materil*. Zirkon yang banyak dimanfaatkan oleh industri untuk berbagai produk konsumen, seperti: keramik, abrasive, refraktori, pigmen, dll tidak bermaksud untuk memanfaatkan karakteristik radiasi dari kandungan U dan Th di dalam Zirkon tersebut, namun karena pertimbangan teknis dan ekonomi yang sulit untuk memisahkan U dan Th (tidak mendapatkan tindakan intervensi), maka ke dua radionuklida terbawa dalam proses produksi.

Potensi bahaya radiasi atau bahaya lain akan muncul dalam tumpukan bahan baku zirkon, sehingga penyimpanannya perlu mendapatkan izin dari BAPETEN. Untuk mendapatkan izin penyimpanan yang berlaku selama 5 (lima) tahun, pemilik zirkon wajib memenuhi persyaratan izin dan persyaratan keselamatan radiasi selama kegiatan berlangsung. Selama kegiatan pemanfaatan zirkon, pemilik zirkon wajib memperhatikan terimaan dosis pekerja dan masyarakat.

Beberapa hal yang mempengaruhi terimaan dosis tersebut, meliputi: disain fasilitas diupayakan tidak akan mengakibatkan terimaan dosis ke masyarakat sebesar 0,3 mSv/tahun dan perencanaan kerja bagi pekerja. Untuk meminimalisasi terimaan dosis, maka lokasi bangunan penyimpanan zirkon terletak pada lokasi yang tidak mudah dijangkau oleh publik, mengendalikan akses ke fasilitas penyimpanan Zirkon, dan memasang tanda radiasi pada fasilitas penyimpanan Zirkon. Mengingat jalur paparan utama dari radiasi Zirkon adalah interna, maka selama bekerja dengan zirkon, pekerja perlu dilengkapi dengan alat pelindung pernapasan; sarung tangan, sepatu boot pelindung; dan kacamata pelindung.

Setelah mempunyai izin penyimpanan dari BAPETEN, pemanfaatan zirkon sebagai bahan baku proses produksi harus dilaporkan kepada BAPETEN. Laporan yang dimaksud memuat paling sedikit: jenis dan lokasi pemanfaatan; kuantitas atau jumlah Zirkon yang

akan dimanfaatkan; kandungan radioaktivitas dalam Zirkon berdasarkan hasil analisis laboratorium yang terakreditasi; asal Zirkon; dan rencana pengelolaan sisa dan/atau limbah pemanfaatan Zirkon.

Mengingat kompleksitas rantai kegiatan zirkon di Indonesia dan konsekuensi dari otonomi daerah, pengawasan zirkon hanya dapat berlangsung jika dilakukan secara terpadu dan terkoordinatif antar instansi terkait di pusat dan daerah. Peran instansi daerah sebagai pemberi izin penambangan, peran kementerian perindustrian pemilik otoritas operasi industri, peran kementerian perdagangan pemberi izin ekspor impor, peran kementerian ESDM sebagai kuasa izin usaha penambangan mineral di pusat sangat menentukan dalam menciptakan pengawasan keselamatan radiasi di industri zirkon, dari hulu sampai dengan hilir. Kebijakan yang tumpang tindih atau saling melemahkan dapat diminimalisasi dengan koordinasi secara terus menerus dan berkelanjutan dengan tetap mengedepankan kepentingan pekerja, masyarakat dan lingkungan, termasuk pula eksistensi industri zirkon. Pengawasan yang diterapkan hendaknya sedemikian rupa tidak menghambat operasional atau kemajuan industri nasional, namun justru sebaliknya, pengawasan dapat meningkatkan pertumbuhan industri nasional, menciptakan persaingan bisnis yang sehat dan profesional. Pengawasan juga diarahkan untuk mampu mempertahankan dan melindungi sumber daya alam nasional dari kelangkaan atau bahkan kepunahan.

KESIMPULAN

Kebijakan pengawasan keselamatan radiasi terhadap industri zirkon dapat dipenuhi dengan Perka BAPETEN No. 16 tahun 2013. Kebijakan tersebut telah sesuai dengan GSR part 3 yang memandang Zirkon sebagai *plan exposure*. Selain itu, pengawasan keselamatan radiasi zirkon dapat terwujud melalui koordinasi dengan instansi terkait sedemikian rupa sehingga dapat menjawab berbagai tantangan dan persoalan zirkon nasional, mewujudkan keselamatan radiasi terhadap pekerja, masyarakat dan lingkungan hidup, serta dapat meningkatkan produktivitas industri zirkon di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

1. IAEA, 2007, SRS No. 51: *Radiation Protection and NORM Residue Management in the Zircon and Zirconia Industries*, Vienna.
2. IAEA, 2011, *Draft Safety Requirements: Radiation Protection and Safety of*

- radiation Sources: International Basic Safety Standards*, Vienna
3. Huda K, Sudarto, Yus Rusdian, 2011, *Peran BAPETEN dalam Pengawasan Zirkon*, Lokakarya Nasional Pengawasan Zirkon-BAPETEN, Jakarta.
 4. Direktorat Jenderal Perdagangan Luar Negeri, 2011, *Kebijakan Ekspor Produk Pertambangan (Bijih Zirkon)*, Lokakarya Nasional Pengawasan Zirkon-BAPETEN, Jakarta.
 5. Direktorat Industri Material Dasar Logam, 2011, *Penggunaan Zirkon Pada Industri*, Lokakarya Nasional Pengawasan Zirkon-BAPETEN, Jakarta.
 6. Peraturan Pemerintah No. 33 tahun 2007 tentang Keselamatan Radiasi Pengion dan Keamanan Sumber Radioaktif
 7. Peraturan Pemerintah No. 29 tahun 2008 tentang Perizinan Sumber Radiasi Pengion dan Bahan Nuklir
 8. Peraturan Kepala BAPETEN No.9 tahun 2009 tentang Intervensi Terhadap Paparan Yang Berasal Dari *Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Material*
 9. Peraturan Kepala BAPETEN No.16 tahun 2013 tentang Keselamatan Radiasi dalam Penyimpanan *Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Material*
 10. P2STPFRZR-BAPETEN, 2012, Laporan Hasil Kajian Efektivitas Operasional Pengawasan FRZR dan Proteksi Radiasi IBN

POLIMORFISME XPD23 PADA PEKERJA RADIASI MEDIK

Wiwin Mailana, dan Yanti Lusiyanti

Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi - Badan Tenaga Nuklir Nasional

Jl Lebak Bulus Raya 49 Jakarta Selatan

E-mail: wiwin@batan.go.id

ABSTRAK

POLIMORFISME XPD23 PADA PEKERJA RADIASI MEDIK. Sistem perbaikan DNA bertanggung jawab untuk menjaga integritas genom dan memiliki peran penting dalam melindungi terhadap mutasi yang dapat menyebabkan kanker. Variasi substansial respon intrinsik individu terhadap radiasi dapat dilihat dari polimorfisme gen DNA perbaikan. Sistem DNA perbaikan bertanggungjawab terhadap kekuatan genom dan mempunyai peran penting dalam melawan mutasi yang menyebabkan kanker. Tujuan dari penelitian ini untuk mendeteksi adanya polimorfisme DNA perbaikan gen XPD 23 pada pekerja radiasi dengan PCR-RFLP. Dari sampel pekerja radiasi dari 4 rumah sakit didapat pita dengan ukuran sekitar 200 bp dan 250 bp yang menandakan genotip AA .

Kata Kunci : pekerja radiasi, xpd23, polimorfisme

ABSTRACT

XPD23 POLYMORPHISM IN RADIATION WORKERS. DNA repair systems are responsible for maintaining the integrity of the genome and have a critical role in protecting against mutations that can lead to cancer. Substantial variation in the intrinsic response of individuals to radiation can be seen from the polymorphism of DNA repair genes. DNA repair systems are responsible for maintaining the integrity of the genome and have a critical role in protecting against mutations that can lead to cancer. The aim of this study to detecting the presence of polymorphisms of DNA repair gene XPD 23 in radiation workers by PCR-RFLP. From a sample of radiation workers obtained band with a size of about 200 bp and 250 bp showing the AA genotype

Keywords : radiation workers, xpd23, polymorphism

PENDAHULUAN

Ribuan masalah dengan DNA muncul setiap hari di setiap sel tubuh, yang masing-masing harus berhasil terdeteksi dan, jika perlu, diubah. Sistem perbaikan DNA mendeteksi dan mengkoordinasikan respon terhadap serangan tersebut, mempengaruhi langkah-langkah untuk mencegah kematian sel atau menghapus sel-sel kanker dari sistem tubuh. Paparan radiasi pengion, salah satu pencetus karsinogen pada manusia melalui kerusakan sel DNA. Beberapa studi menunjukkan terjadinya kerusakan kromosom DNA pada pekerja rumah sakit yang terkena radiasi pengion, meskipun sebagian besar penelitian ini gagal untuk menjelaskan hubungannya dengan radiasi dosis rendah (1) Struktur DNA dapat rusak akibat paparan radiasi pengion (2). Radiasi Pengion merusak sel DNA dalam beberapa cara sehingga membutuhkan tindakan dari sejumlah enzim DNA repair secara bersama untuk pemeliharaan struktur DNA (3). Kemampuan untuk memperbaiki kerusakan DNA sangat terkait dengan risiko kanker dan penyakit manusia lainnya seperti neurodegenerative dan gangguan peradangan, dan penuaan karena merupakan mekanisme pertahanan yang memainkan peran penting

dalam kelangsungan hidup sel dan pemeliharaan stabilitas genom (4).

DNA repair memainkan peranan penting dalam pemeliharaan struktur genomik, dan berkurangnya fungsi perbaikan, dan akhir akhir ini dikaitkan dengan perkembangan kanker (5). Polimorfisme DNA repair dapat mewakili faktor kerentanan yang mempengaruhi struktur DNA, dan kemungkinan risiko kanker dalam populasi manusia. Untuk menjelaskan pengaruh adanya polimorfisme DNA repair, maka dipelajari kerusakan DNA pada tingkat individu dan hubungannya dengan gaya hidup dan paparan dari lingkungan(4). Polimorfisme ini juga penting dalam menentukan kemampuan individu untuk memperbaiki sel DNA setelah paparan radiasi pengion (5).

XPD (*xeroderma pigmentosum complementation group D*) juga disebut ERCC2, gen yang mengkode aktivitas helikase ATP-dependent DNA yang berpartisipasi dalam perbaikan dengan mengeluarkan/memotong nukleotida (6).

Salah satu teknik dalam mendeteksi polimorfisme yaitu dengan teknik *Restriction Fragment Length Polymorphisms* (RFLP). Pemeriksaan DNA perbaikan merupakan

pemeriksaan biomarker yang dibutuhkan dan sangat berguna.

METODOLOGI

Subjek penelitian didapatkan dari pekerja radiasi dari 4 Rumah sakit di Jakarta dan di Jawa Barat yang memenuhi kriteria inklusi.

Ekstraksi DNA

Pekerja radiasi diambil darah melalui vena sebanyak 0,5 ml dan diekstraksi menggunakan High Pure Extraction PCR dari Roche.

Amplifikasi dengan Realtime PCR

Reaksi PCR dilakukan dalam volume reaksi 20 μ l yang terdiri dari 0,5 μ l *forward primer* dan *reverse primer*, 5 μ l DNA dan *Faststart Essential DNA Green Master* 10 μ l, *Water PCR Grade* 4 μ l. *Primer* yang digunakan yaitu terdiri dari *forward primer* (5'-GGT-CCT-TCT-CCG-ACT-CCC--3'), *reverse primer* (5'-CTG-CCT-TCT-CCT-GCG-ATT-3') dengan suhu *annealing* 61°C.

Siklus PCR dimulai dari pre-denaturasi pada suhu 95°C selama 10 menit. Siklus PCR yaitu 30 siklus yang terdiri dari tahap denaturasi pada 95°C selama 20 detik, *annealing* pada 55°C selama 20 detik dan *elongation* pada 72°C selama 20 detik. Setelah itu, *melting* yang terdiri

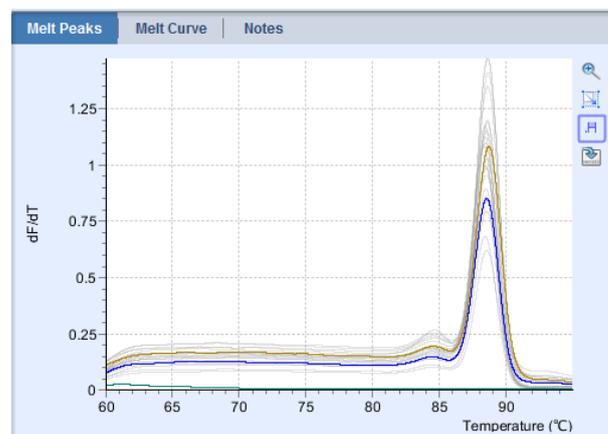
dari *initial stage* pada 60°C selama 20 detik dan *final stage* pada 95°C selama 20 detik. Selanjutnya hasil PCR akan dilakukan metode elektroforesis dan RFLP.

Elektroforesis RFLP

Sampel hasil amplifikasi PCR decampur dengan 0,5 ul enzim PstI dan diinkubasi selama 2 jam pada suhu 37 °C. Kemudian dipisahkan pada gel agarosa 2%. Alat elektroforesis diset pada voltase 50 V selama 2,5 jam. Hasil dibaca menggunakan GelDoc. Dan ditentukan genotipe menurut ukuran bp

HASIL DAN PEMBAHASAN

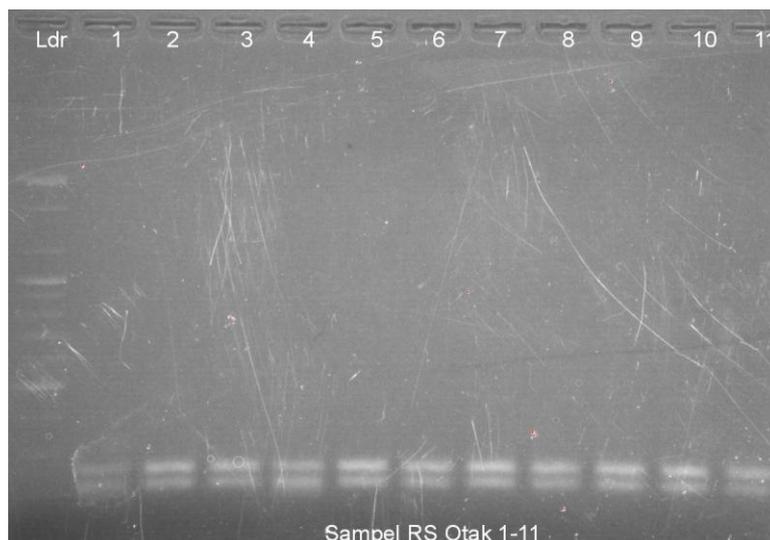
Hasil isolasi DNA pasien selanjutnya akan diPCR untuk mengamplifikasi sekuens DNA yang diinginkan dengan menggunakan *real-time* PCR. *Real-time* PCR dapat mendeteksi jumlah produk PCR (amplikon) pada setiap siklus PCR dengan menggunakan *fluorescence*. Pada tahap akhir *real-time* PCR dapat diprogram untuk menghasilkan suatu kurva suhu peleburan dan menghitung *melting temperature* (T_m) produk PCR [13]. Analisis pada peleburan (*melting analysis*) sudah menjadi bagian dari teknik *real-time*. Setiap DNA memiliki titik lebur (*melting temperature* / T_m). Hasil amplifikasi sampel DNA ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Hasil Realtime PCR pada pekerja radiasi

Pada gambar 1 terlihat amplifikasi DNA pada sampel pekerja radiasi medik menggunakan *annealing* 61 °C dan terdapat satu kurva pada masing-masing sampel. Hal ini bertanda bahwa sampel berhasil diamplifikasi dengan baik dan tidak terdapat kontaminasi. Produk hasil PCR dapat dianalisis sesuai dengan informasi yang ingin didapatkan seperti untuk

mengetahui ada atau tidaknya DNA target atau panjang produk DNA. Dari hasil amplifikasi selanjutnya dilakukan elektroforesis menggunakan metode elektroforesis RFLP. Hasil visualisasi PCR dengan elektroforesis untuk melihat hasil produk PCR ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Hasil Elektroforesis pada pekerja radiasi

Dari hasil visualisasi sampling elektroforesis hasil PCR diperoleh ukuran DNA dalam kisaran 200 bp dan 250 bp merupakan

genotip normal homozygote AA. Data hasil elektroforesis sampel ditampilkan dalam table 1.

Tabel 1. Genotip Hasil Elektroforesis Pekerja Radiasi

Rumah Sakit	Jumlah sampel	Ukuran DNA (bp)/Genotip	
RS A	22	200 250	AA
RS B	12	200 250	AA
RS C	12	200 250	AA
RS D	15	200 250	AA

Berdasarkan hasil elektroforesis pada umumnya semua sampel pekerja radiasi bergenotip normal homozygot AA. Semua sampel pekerja radiasi tidak ditemukan genotip AC seperti yang didapat pada sampel kanker serviks yang telah dikerjakan tahun sebelumnya. Menurut J.J Hu (2002) varian alel dari Lys751Gln (AC) dikaitkan dengan risiko kanker paru-paru dan kanker kepala dan leher. Ada beberapa hipotesis dimana polimorfisme XPD6 bentuk varian alel dapat mempengaruhi stabilitas mRNA atau mengganggu sintesis protein. Protein XPD memiliki peran ganda yaitu dalam perbaikan DNA dan transkripsi DNA. Peran transkripsi penting untuk mengendalikan ekspresi gen secara imunologis. Pada penelitian JJ Topinka (2007), polimorfisme XPD 23 dengan genotip AA lebih banyak terkena bronkitis dibanding dengan genotip AC dan CC.

KESIMPULAN

Deteksi DNA repair pada sampel pekerja radiasi diperoleh adalah genotip AA dengan ukuran berkisar 200 bp dan 250 bp. Tidak ditemukan genotip AC yang berhubungan dengan kanker serviks, kanker paru paru dan kanker kepala dan leher.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih saya ucapkan kepada keempat rumah sakit dengan team yang telah memberikan sumbang dan saran terhadap penelitian ini. Pada BATAN yang telah memberikan kontribusi dalam terlaksananya penelitian ini dengan dana DIPA PTKMR 2012-2013. Penulis juga mengucapkan banyak terima

kasih kepada Laboratorium Biologi Molekuler PTKMR.

DAFTAR PUSTAKA

1. Andreassia, Maria Grazia; Foffaa, Ilenia; Manfredia, Samantha; Bottoa, Nicoletta; Cioppac, Angelo; Picano, Eugenio; Genetic polymorphisms in XRCC1, OGG1, APE1 and XRCC3 DNA repair genes, ionizing radiation exposure and chromosomal DNA damage in interventional cardiologists, *Mutation Research* 666, 57–63, 2009
2. Ilse Decordier, Kim Vande Look, Micheline Kirsch-Volders, Review: Phenotyping For DNA repair capacity, *Mutation Research* 705, 107–129, 2010
3. Sharbel Weidner Maluf, Monitoring DNA damage following radiation exposure using cytokinesis–block micronucleus method and alkaline single-cell gel electrophoresis, *Clinica Chimica Acta* 347, 15–24, 2004
4. A. Zijnoa, A. Verdinab, R. Galatib, P. Leopardia, F. Marcona, C. Andreolia, S. Rossia, R. Crebellia, Influence of DNA repair polymorphisms on biomarkers of genotoxic damage in peripheral lymphocytes of healthy subjects, *Mutation Research* 600, 184–192, 2006
5. Angelinia, Sabrina, Micronuclei in humans induced by exposure to low level of ionizing radiation: influence of polymorphisms in DNA repair genes, *Mutation Research* 570, 105–117, 2005
6. Sreemanta Pramanik, Saravana Devi, Sanghamitra Chowdhary, Subin T. Surendran, Kannan Krishnamurthi, Tapan Chakrabarti, DNA repair gene polymorphisms at XRCC1, XRCC3, XPD, and OGG1 loci in Maharashtrian population of central India, *Chemosphere* 82, 941–94, 2011
7. Stuart G. Clarkson, Richard D. Wood, Polymorphisms in the human XPD (ERCC2) gene, DNA repair capacity and cancer susceptibility: An appraisal, *DNA Repair* 4, 1068–1074, 2005
8. William W. Aua, Panida Navasumritb, Mathuros Ruchirawat, Use of biomarkers to characterize function of polymorphic DNA repair genotypes, *Int. J. Hyg. Environ. Health* 207; 301–313, 2004
9. J. J. Hu, H. W. Mohrenweiser, D. A. Bell, S. A. Leadon, and M. S. Miller, Symposium Overview: Genetic Polymorphisms in DNA Repair and Cancer Risk, *Toxicology and Applied Pharmacology* 185, 64–73, 2002
10. Jan Topinkaa, Irva Hertz-Picciottob, Miroslav Dostala, Irena Chvatalovaa, Poh-Sin Yapb, Caroline E.W. Herrc, Teri Greenfieldb, Radim J. Srama, The DNA repair gene XPD/ERCC2 polymorphisms Arg156Arg (exon 6) and Lys751Gln (exon 23) are closely associated, *Toxicology Letters* 172, 85–89, 2007
11. KOMAR AA, Single Nucleotide Polymorphisms Method and Protocols Second Edition. USA. Humana press, 2009
12. DORAK MT, *Real-time PCR*, UK: Taylor & Francis Group, 2006
13. SAMBROOK J, RUSSELL DW, *Molecular Cloning : A Laboratory Manual 1 Third Edition*. New York: Cold Spring Harbor Laboratory Press 2001.

PENGUKURAN RADIASI DAN KONSENTRASI *NATURALLY OCCURRING RADIOACTIVE MATERIALS (NORM)* PADA LAHAN CALON TAPAK PLTU BATUBARA KRAMATWATU SERANG BANTEN

Sucipta, Risdiyana S., Arimuladi SP.

*Pusat Teknologi Limbah Radioaktif - Badan Tenaga Nuklir Nasional
Kawasan Puspipstek Serpong Gedung 50, Tangerang Selatan, Banten 15310
E-mail : scipta@batan.go.id*

ABSTRAK

PENGUKURAN RADIASI DAN KONSENTRASI *NATURALLY OCCURRING RADIOACTIVE MATERIALS (NORM)* PADA LAHAN CALON TAPAK PLTU BATUBARA KRAMATWATU SERANG BANTEN. Telah dilakukan pengukuran radiasi *Naturally Occuring Radioactive Materials (NORM)* di lingkungan calon tapak PLTU Kramatwatu Serang Banten. Pengukuran radiasi dan konsentrasi NORM dilakukan untuk mengetahui rona awal radiasi dan konsentrasi NORM sebelum wilayah tersebut digunakan untuk kegiatan PLTU. Lingkup pekerjaan yang dilakukan meliputi pengukuran laju paparan gamma dan konsentrasi *NORM*, serta pengambilan contoh tanah permukaan. Radionuklida NORM yang diukur konsentrasinya meliputi K-40, Ra-226 dan Th-232. Dalam kegiatan survey atau pengukuran radiasi NORM dilakukan dengan alat *Gamma Spectrometry Portable, Surveymeter, AustralRAD* dan *Global Positioning System (GPS)*. Area kerja pengukuran meliputi *TN-1* dan *TN-2* yang termasuk dalam wilayah calon tapak PLTU, serta *TN-3* dan *TN-4* yang berada di luar wilayah tapak PLTU. Dari hasil pengukuran radiasi *NORM* diperoleh data bahwa ke 4 lokasi pengukuran memiliki konsentrasi NORM yang sifatnya bernilai latar (*background*). Konsentrasi NORM pada ke 4 titik pengukuran tersebut masih jauh di bawah nilai maksimum yang diijinkan berdasarkan Peraturan Kepala (Perka) Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPATEN) dan rekomendasi Badan Tenaga Nuklir Internasional (IAEA).

Kata kunci : pengukuran, NORM, tapak, PLTU.

ABSTRACT

RADIATION AND CONCENTRATION MEASUREMENT OF *NATURALLY OCCURRING RADIOACTIVE MATERIALS (NORM)* ON LAND OF SITE CANDIDATE FOR COAL POWER PLANT (CPP) AT KRAMATWATU SERANG BANTEN. *NORM radiation measurement of site candidate for coal power plant at Kramatwatu Serang Banten has been carried out. NORM radiation measurements conducted to determine baseline radiation and the concentration of NORM before the area is used for the plant. Scope of work performed includes measurements gamma exposure rate and the concentration of NORM, as well as surface soil sampling. NORM radionuclides concentration measured include K-40, Ra-226 and Th-232. In surveys or NORM radiation measurements performed with a Portable Gamma Spectrometry, Surveymeter, AustralRAD and Global Positioning System (GPS). The work area includes the measurement of TN-1 and TN-2 were included in the prospective power plant site, and TN-3 and TN-4 located outside the territory of the power plant site. From the measurement results, NORM radiation data showed that all four measurement locations have NORM concentrations that are worth the background. The concentration of NORM in all four measurement points is still far below the maximum allowable under Decree of BAPATEN Chairman and recommendation the International Atomic Energy Agency (IAEA).*

Key words : measurement, NORM, site, CPP

PENDAHULUAN

Pembangunan dan pengoperasian Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) batubara dengan kapasitas ≥ 100 MW dalam satu lokasi termasuk dalam jenis rencana usaha dan atau kegiatan yang wajib memiliki Analisis Mengenai Dampak Lingkungan (AMDAL)^[1]. Dalam pengoperasian PLTU tersebut diperkirakan akan menimbulkan dampak penting aspek fisik-kimia berupa pencemaran terhadap udara, air dan tanah. Beroperasinya PLTU batubara menyebabkan sejumlah kelompok radionuklida alamiah terlepas ke lingkungan

udara yang akan terdeposisi ke badan air maupun permukaan tanah. Radionuklida yang terlepas dari pengoperasian PLTU batubara diketahui sebagai radionuklida golongan TENORM (*Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials*), yaitu radionuklida alamiah yang mengalami peningkatan akibat ada teknologi (campur tangan) manusia. Radionuklida-radionuklida yang terlepas dari pengoperasian PLTU batubara tersebut umumnya mempunyai waktu paruh relatif lama (orde tahunan). Jenis radionuklida yang terlepas ke atmosfer dari pengoperasian PLTU batubara tergantung dari beberapa faktor, diantaranya

yaitu konsentrasi radionuklida dalam batubara, kandungan abu dari batubara, temperatur pembakaran, system penyekat antara *fly* dan *bottom ash*, serta efisiensi kendali emisi^[2]. Untuk mengetahui rona awal lingkungan dari aspek radiasi dan konsentrasi NORM dalam tanah wilayah tapak maka perlu dilakukan pengukuran radiasi dan konsentrasi NORM sebelum dimulainya konstruksi dan operasi PLTU.

Menurut Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 33 Tahun 2007^[3] dan Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 9 Tahun 2009^[4], *Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Material* selanjutnya disingkat *TENORM* adalah zat radioaktif alam yang dikarenakan kegiatan manusia atau proses teknologi terjadi peningkatan paparan potensial jika dibandingkan dengan keadaan awal. Setiap orang atau badan yang karena kegiatannya dapat menghasilkan mineral ikutan berupa *TENORM* harus melaksanakan intervensi terhadap terjadinya paparan yang berasal dari *TENORM* melalui tindakan remedial. Intervensi adalah setiap tindakan untuk mengurangi atau menghindari paparan atau kemungkinan terjadinya paparan kronik dan paparan darurat. Pelaksanaan intervensi dimaksud hanya diberlakukan untuk *NORM* dan *TENORM* dengan konsentrasi radioaktif melebihi tingkat intervensi. Tingkat Intervensi adalah tingkat dosis yang dapat dihindari dengan melakukan tindakan protektif atau remedial untuk situasi paparan kronik atau paparan darurat.

Pada umumnya konsentrasi *NORM* dalam bahan alamiah adalah rendah, namun demikian konsentrasi yang relatif tinggi bisa ditemukan akibat dari aktivitas manusia, sebagai contohnya adalah *TENORM* dalam pertambangan dan industri. Proses pengolahan bahan mentah hasil tambang dapat meningkatkan konsentrasi radionuklida sehingga mencapai tingkat radiasi yang perlu diperhatikan dalam penanganan, penyimpanan, pengangkutan dan peralatan proses. *NORM/TENORM* meliputi unsur uranium, thorium, radium, radon dan produk anak luruhnya^[5].

NORM/TENORM memiliki potensi sebagai penyebab paparan secara eksternal dan internal terhadap masyarakat dan pekerja. Selama operasi produksi tambang normal, bahaya radiasi hanya berasal dari emisi gamma *NORM/TENORM* yang terkumpul di dalam lokasi penambangan. Lokasi tambang tersebut biasanya terbuka selama operasi, maupun dalam masa pemeliharaan, maka personil akan dapat bersentuhan langsung dengan *NORM/TENORM*. Kondisi demikian akan menyebabkan paparan eksternal dan internal. Paparan internal oleh *NORM/TENORM* dapat terjadi secara injeksi atau inhalasi ketika ada pengerjaan pada atau di dalam

fasilitas dan peralatan, penanganan limbah dan benda-benda terkontaminasi permukaan, serta selama pembersihan peralatan terkontaminasi. Paparan internal juga dapat terjadi akibat inhalasi debu udara yang mengandung radionuklida alam dan inhalasi gas radon dan thoron.

Berdasarkan rekomendasi yang ditetapkan dalam *Basic Safety Standard* yang dikeluarkan oleh Badan Tenaga Atom Internasional (*International Atomic Energy Agency = IAEA*)^[5], apabila konsentrasi radionuklida dalam material lebih dari atau sama dengan 1 Bq/g dan laju paparan gamma dari material tersebut lebih dari atau sama dengan 50 μ R/jam, maka material tersebut dinyatakan radioaktif. Menurut Perka BAPETEN Nomor 9 Tahun 2009^[4], tingkat intervensi diberlakukan dengan ketentuan berikut, yaitu jumlah atau kuantitas *NORM/TENORM* paling sedikit 2 (dua) ton, dan tingkat kontaminasi sama dengan atau lebih tinggi dari 1 Bq/cm² (satu becquerel persentimeter persegi) dan/atau konsentrasi aktivitas sebesar 1 Bq/gr (satu becquerel pergram) untuk tiap radionuklida anggota deret uranium dan thorium; atau 10 Bq/gr (sepuluh becquerel pergram) untuk kalium.

Pengelolaan *NORM/TENORM* dilaksanakan agar tidak mencemari lingkungan dan membahayakan masyarakat. Beberapa langkah pengelolaan yang harus dilakukan meliputi inventarisasi, identifikasi, pengangkutan, *on-site* atau *off-site treatment*, pewadahan, penyimpanan sementara dan penyimpanan lestari (*landfill/disposal*). Beberapa negara maju telah berpengalaman dalam melakukan pengelolaan limbah *NORM/TENORM*, mulai dari inventarisasi hingga pengoperasian *landfill*^[6-16]. Pengalaman dari negara-negara maju tersebut bisa dikaji untuk dikembangkan dan diterapkan di Indonesia.

Dengan konsep pengelolaan limbah *NORM/TENORM* tersebut maka diharapkan masalah limbah *NORM/TENORM* dapat ditangani dengan baik, dan akhirnya setelah ditemukan konsep yang optimal akan bisa diterapkan di masa mendatang untuk mendukung program industri nasional yang dapat menyejahterakan masyarakat.

Tujuan dari pengukuran radiasi dan konsentrasi NORM adalah untuk mengetahui rona awal radiasi dan konsentrasi NORM sebelum wilayah tersebut digunakan untuk kegiatan PLTU. Lingkup pekerjaan yang dilakukan meliputi pengukuran laju paparan gamma dan konsentrasi *NORM*, serta pengambilan contoh tanah permukaan. Radionuklida *NORM* yang diukur

konsentrasinya meliputi K-40, Ra-226 dan Th-232.

METODOLOGI

Pengukuran NORM dilakukan pada wilayah calon tapak PLTU di daerah Kramatwatu, Kabupaten Serang, Propinsi Banten, pada tanggal 14-15 Januari 2016, seperti ditunjukkan dalam Gambar 1.

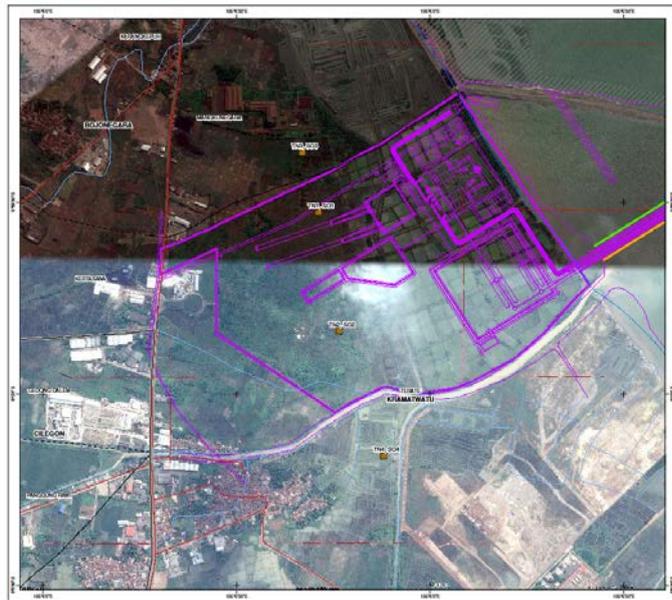
Perlengkapan yang digunakan dalam pengukuran NORM adalah sebagai berikut : *Gamma Spectrometer Portable (GSP Atomtec) AT6101DR, Surveymeter model 3-97 Ludlum-USA, AustralRAD Mini 8-in-1 Wireless Gammasonics, Global Positioning System (GPS), soil sampler, plastic bag* dengan kapasitas 2 liter, peralatan pelindung diri (*helmet, safety shoes, goggles*), *TLD, hand-tools (e.g. spade, hoe, pail and wheelbarrow)*, peta lokasi, kamera digital, *Personal Computer*.

Pengukuran NORM di lapangan dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut :

1. Pengamatan kondisi lingkungan;
2. Penentuan lokasi pengukuran (2 titik di dalam tapak dan 2 titik di luar tapak), dengan memilih tanah atau lahan yang masih asli (*undisturbed*);

3. Penentuan dan pencatatan posisi koordinat geografi dari titik pengukuran;
4. *Setting on* alat ukur pada posisi titik pengukuran baik *Atomtec, Surveymeter* maupun *AustralRAD*;
5. Pengukuran dengan *GSP Atomtec* dilakukan sebanyak 5 kali pengulangan dengan interval waktu 3-5 menit;
6. Pengukuran radiasi dengan *Surveymeter* dan *AustralRAD* dilakukan sebanyak 5 kali pengulangan dengan lokasi titik pengukuran yang berbeda (di titik pusat, 10 m utara, 10 meter timur, 10 m selatan dan 10 meter barat);
7. Pembacaan dan pencatatan hasil pengukuran pada form pencatatan;
8. *Setting off* masing-masing alat ukur;
9. Pengambilan contoh tanah permukaan sebanyak lebih kurang 2 kg dengan sekop atau cangkul;
10. Pewadahan dan pemberian label contoh tanah dalam kantong plastik sampel;
11. Pengepakan alat untuk pindah ke lain lokasi;

Kegiatan paska lapangan adalah kegiatan laboratorium dan studio atau kantor, yang meliputi preparasi contoh, analisis laboratorium, evaluasi hasil analisis, pengolahan data dan pembuatan laporan.



Gambar 1. Lokasi pengukuran NORM

HASIL DAN PEMBAHASAN

Morfologi asli wilayah tapak pengukuran NORM berupa dataran aluvial kaki perbukitan (bagian barat) dan dataran pantai laut Jawa (bagian timur). Secara geologi, lokasi pengukuran NORM tersusun oleh endapan

alluvial berumur kuartar yang berupa pasir, lanau dan lumpur dengan sedikit kerikil-kerakal. Penggunaan lahan daerah pengukuran NORM dan sekitarnya berupa sawah, kawasan industri, permukiman, semak, kebun, tambak dan pantai (Gambar 1 dan 2).



Lokasi TN-1



Lokasi TN-2



Lokasi TN-3



Lokasi TN-4

Gambar 2. Lokasi pengukuran NORM yang berupa dataran dengan penggunaan lahan kebun (lokasi TN-1), lahan kosong (lokasi TN-2), sawah (lokasi TN-3) dan semak (lokasi TN-4).

Kondisi lapangan dan kegiatan pengukuran radiasi dan konsentrasi NORM serta pengambilan contoh tanah dapat dilihat pada

Gambar 3. Hasil pengukuran radiasi dan konsentrasi NORM dapat dilihat pada Tabel 1, 2, 3 dan 4.

**Tabel 1. Hasil pengukuran dosis radiasi dan konsentrasi NORM Lokasi TN-01,
 Koordinat Lokasi S : 05° 59' 33.4" E : 106° 05' 34.0"**

No	Elevasi (m)	Laju Dosis ($\mu\text{Sv/h}$)		Konsentrasi Aktivitas (Bq/kg)			Aktivitas Efektif NORM (Bq/kg)
		Survey-meter	Austral RAD	K-40	Ra-226	Th-232	
1	14	0,050	0,052	36,20	40,40	20,20	68,3±7,8
2	14	0,050	0,052	36,40	38,30	20,50	66,6±7,7
3	14	0,050	0,070	33,30	40,90	15,80	62,8±7,3
4	14	0,050	0,052	38,20	42,50	17,30	66,8±7,5
5	14	0,060	0,070	27,10	40,60	15,80	63,6±7,3
	Rata-rata	0,052	0,059	34,24	40,54	17,92	65,6±7,5

Data hasil pengukuran radiasi dan konsentrasi NORM dari lokasi TN-01 ditunjukkan pada Tabel 1. Dari tabel tersebut dapat diketahui bahwa laju dosis yang diukur dengan *Survey-meter* berkisar antara 0,050 sampai dengan 0,060 $\mu\text{Sv/h}$ dengan nilai rata-rata adalah 0,052 $\mu\text{Sv/h}$. Laju dosis yang diukur dengan *AustralRAD* berkisar antara 0,052 – 0,070 $\mu\text{Sv/h}$. Konsentrasi Ka-40 berkisar antara 27,10 sampai

dengan 38,20 Bq/kg, dengan rata-rata sebesar 34,24 Bq/kg. Konsentrasi Ra-226 dalam tanah di lokasi 1 berkisar antara 38,30 – 42,50 Bq/kg, dengan rata-rata sebesar 40,54 Bq/kg. Konsentrasi Th-232 berkisar antara 15,80 – 20,50 Bq/kg dan rata-rata sebesar 17,92 Bq/kg. Aktivitas efektif NORM berkisar antara 62,8 ± 7,3 sampai dengan 68,3 ± 7,8 Bq/kg dengan rata-rata sebesar 65,6 ± 7,5 Bq/kg.



Lokasi TN-1



Lokasi TN-2



Lokasi TN-3



Lokasi TN-2



Lokasi TN-4



Gambar 3. Kegiatan pengukuran NORM di lapangan

Data hasil pengukuran radiasi dan konsentrasi NORM dari lokasi TN-02 dapat dilihat pada Tabel 2. Dari tabel tersebut dapat diketahui bahwa laju dosis yang diukur dengan *Surveyrometer* berkisar antara 0,050 sampai dengan 0,070 $\mu\text{Sv/h}$ dengan nilai rata-rata adalah 0,062 $\mu\text{Sv/h}$. Laju dosis yang diukur dengan *AustralRAD* berkisar antara 0,052 – 0,070 $\mu\text{Sv/h}$ dan rata-rata 0,062 $\mu\text{Sv/h}$. Konsentrasi $\text{K}\alpha\text{-40}$ berkisar antara 19,80 sampai dengan 36,70

Bq/kg , dengan rata-rata sebesar 29,56 Bq/kg . Konsentrasi Ra-226 dalam tanah di lokasi TN-2 berkisar antara 33,40 – 41,20 Bq/kg , dengan rata-rata sebesar 37,12 Bq/kg . Konsentrasi Th-232 berkisar antara 17,10 – 22,00 Bq/kg dan rata-rata sebesar 19,46 Bq/kg . Aktivitas efektif NORM berkisar antara $62,1 \pm 7,5$ sampai dengan $68,9 \pm 7,9$ Bq/kg dengan rata-rata sebesar $64,8 \pm 7,6$ Bq/kg .

Tabel 2. Hasil Pengukuran dosis radiasi dan konsentrasi NORM Lokasi TN-02, Koordinat Lokasi S : 05° 59' 51.1" E : 106° 05' 46.8"

No	Elevasi (m)	Laju Dosis ($\mu\text{Sv/h}$)		Konsentrasi Aktivitas (Bq/kg)			Aktivitas Efektif NORM (Bq/kg)
		Survey-meter	Austral RAD	K-40	Ra-226	Th-232	
1	19	0,060	0,052	19,80	38,10	17,60	62,9 \pm 7,4
2	19	0,050	0,052	29,30	34,10	19,50	62,1 \pm 7,5
3	19	0,070	0,070	33,20	38,80	22,00	68,9\pm7,9
4	19	0,070	0,070	28,80	33,40	21,10	63,4 \pm 7,7
5	19	0,060	0,070	36,70	41,20	17,10	66,8 \pm 7,5
	Rata-rata	0,062	0,062	29,56	37,12	19,46	64,8\pm7,6

Hasil pengukuran radiasi dan konsentrasi NORM dari lokasi TN-03 seperti ditunjukkan pada Tabel 3. Dari tabel tersebut dapat diketahui bahwa laju dosis yang diukur dengan *Survey-meter* berkisar antara 0,050 sampai dengan 0,060 $\mu\text{Sv/h}$ dengan nilai rata-rata adalah 0,054 $\mu\text{Sv/h}$. Laju dosis yang diukur dengan *AustralRAD* berkisar antara 0,052 – 0,087 $\mu\text{Sv/h}$ dan rata-rata 0,062 $\mu\text{Sv/h}$. Konsentrasi Ka-40 berkisar antara 20,20 sampai dengan 33,50

Bq/kg, dengan rata-rata sebesar 28,84 Bq/kg. Konsentrasi Ra-226 dalam tanah di lokasi TN-3 berkisar antara 31,00 – 34,30 Bq/kg, dengan rata-rata sebesar 32,76 Bq/kg. Konsentrasi Th-232 berkisar antara 17,20 – 23,20 Bq/kg dan rata-rata sebesar 20,04 Bq/kg. Aktivitas efektif NORM berkisar antara 57,0 \pm 7,2 sampai dengan 59,3 \pm 7,5 Bq/kg dengan rata-rata sebesar 58,0 \pm 7,3 Bq/kg.

Tabel 3. Hasil Pengukuran dosis radiasi dan konsentrasi NORM Lokasi TN-03, Koordinat Lokasi S : 05° 59' 26.9" E : 106° 05' 33.4"

No	Elevasi (m)	Laju Dosis ($\mu\text{Sv/h}$)		Konsentrasi Aktivitas (Bq/kg)			Aktivitas Efektif NORM (Bq/kg)
		Survey-meter	Austral RAD	K-40	Ra-226	Th-232	
1	20	0,050	0,052	29,00	31,00	20,90	59,3\pm7,5
2	20	0,060	0,087	33,50	34,20	23,20	58,4 \pm 7,2
3	20	0,060	0,070	20,20	34,30	17,20	58,4 \pm 7,2
4	20	0,050	0,052	32,40	31,60	18,50	57,0 \pm 7,2
5	20	0,050	0,052	29,10	32,70	20,40	57,0 \pm 7,2
	Rata-rata	0,054	0,062	28,84	32,76	20,04	58,0\pm7,3

Hasil pengukuran radiasi dan konsentrasi NORM dari lokasi TN-04 seperti ditunjukkan pada Tabel 4. Dari tabel tersebut dapat diketahui bahwa laju dosis yang diukur dengan *Survey-meter* berkisar antara 0,040 sampai dengan 0,070 $\mu\text{Sv/h}$ dengan nilai rata-rata adalah

0,054 $\mu\text{Sv/h}$. Laju dosis yang diukur dengan *AustralRAD* berkisar antara 0,032 – 0,070 $\mu\text{Sv/h}$ dan rata-rata 0,052 $\mu\text{Sv/h}$. Konsentrasi Ka-40 berkisar antara 21,30 sampai dengan 25,20 Bq/kg, dengan rata-rata sebesar 23,28 Bq/kg.

Tabel 4. Hasil Pengukuran dosis radiasi dan konsentrasi NORM Lokasi TN-04, Koordinat Lokasi S : 06° 00' 09.2" E : 106° 05' 46.2"

No	Elevasi (m)	Laju Dosis ($\mu\text{Sv/h}$)		Konsentrasi Aktivitas (Bq/kg)			Aktivitas Efektif NORM (Bq/kg)
		Survey-meter	Austral RAD	K-40	Ra-226	Th-232	
1	23	0,070	0,070	24,60	30,10	27,70	68,5 \pm 6,4
2	23	0,060	0,052	22,40	32,00	23,00	64,1 \pm 6,1
3	23	0,040	0,032	25,20	32,00	27,50	70,2 \pm 6,5
4	23	0,050	0,052	22,90	33,50	23,10	65,7 \pm 6,1
5	23	0,050	0,052	21,30	32,50	28,80	72,1\pm6,6
	Rata-rata	0,054	0,052	23,28	32,02	26,02	68,1\pm6,3

Konsentrasi Ra-226 dalam tanah di lokasi TN-4 berkisar antara 30,10 – 33,50 Bq/kg, dengan rata-rata sebesar 32,02 Bq/kg. Konsentrasi Th-232 berkisar antara 23,00 – 28,80 Bq/kg dan rata-rata sebesar 26,02 Bq/kg. Aktivitas efektif NORM berkisar antara $64,1 \pm 6,1$ sampai dengan $68,5 \pm 6,4$ Bq/kg dengan rata-rata sebesar $68,1 \pm 6,3$ Bq/kg.

Perbandingan Konsentrasi NORM dalam Batubara, Bottom Ash dan Fly Ash

Pada Tabel 5 ditunjukkan perbandingan konsentrasi NORM dalam batubara dari berbagai negara. Konsentrasi K-40 berkisar antara tak terdeteksi (ttd) hingga 760 Bq/kg, U-238 antara

ttd hingga 250 Bq/kg, Ra-226 berada pada kisaran antara ttd sampai dengan 100 Bq/kg, Pb-210 dari tidak terdeteksi (ttd) hingga 52 Bq/kg, Po-210 berkisar antara ttd s/d 30, Th-332 berkisar antara ttd – 111 Bq/kg dan Ra-228 antara ttd sampai 35 Bq/kg. Radionuklida yang relatif umum dijumpai di setiap negara sebagai NORM adalah K-40, Ra-226 dan Th-232.

Pada Tabel 6 ditunjukkan perbandingan konsentrasi radionuklida NORM dalam fly ash PLTU batubara di beberapa negara. Dalam fly ash PLTU batubara mengandung K-40 antara ttd hingga 1000 Bq/kg, Ra-226 antara 15 hingga 999 Bq/kg, dan Th-232 antara ttd sampai 300 Bq/kg.

Tabel 5. Konsentrasi radionuklida dalam batubara dari beberapa negara^[2,17-20]

No.	Asal Batubara	Konsentrasi radionuklida (Bq/kg)						
		K-40	U-238	Ra-226	Pb-210	Po-210	Th-232	Ra-228
1	Australia	ttd	ttd	30-48	ttd	ttd	ttd	ttd
2	Brasil	370	ttd	100	ttd	ttd	67	ttd
3	Kanada	440	ttd	30	ttd	ttd	26	ttd
4	Cekoslovakia	ttd	ttd	4,1-13	ttd	ttd	ttd	ttd
5	China: - jenis 1 - jenis 2	ttd	ttd	7	ttd	ttd	ttd	ttd
		69	-	27	52	-	26	-
6	Jerman: - bituminus - coklat	ttd	<40	20	25	30	<20	ttd
		ttd	15	<10	10	10	<7	ttd
7	Hungaria	ttd	ttd	1,5	ttd	ttd	ttd	ttd
8	India	ttd	ttd	25	ttd	ttd	ttd	35
9	Italia: -lignit (Italia tengah) -lignit (Sardinia)	ttd	15- 25	4-15	ttd	ttd	74-111	ttd
		ttd	250	ttd	ttd	ttd	ttd	ttd
10	Polandia: - jenis I - jenis II	290	38	ttd	ttd	ttd	30	ttd
		37-760	2-140	ttd	ttd	ttd	7-110	
11	Afrika Selatan	110	ttd	30	ttd	ttd	20	ttd
12	Rusia	120	28	ttd	ttd	22	ttd	ttd
13	Inggris: - jenis I - jenis II	120	17	ttd	ttd	ttd	17	ttd
		ttd	11-29	7,4-94	ttd	ttd	2,4-19	ttd
14	Amerika Serikat - Bagian Barat - Illinois & Kentucky - Alabama, Tennessee - Wyoming I - Wyoming II	110	20	16	17	ttd	13	13
		44	27	ttd	ttd	ttd	8,5	ttd
		120	ttd	8,9	ttd	ttd	27	ttd
		ttd	ttd	0,52	10	ttd	ttd	ttd
		ttd	18	ttd	31	41	ttd	ttd
15	Venezuela	110	ttd	<20	ttd	ttd	<20	ttd
16	Rumania : - coklat - lignit - campuran	310	39	38	-	-	30	-
		274	41	74	-	-	25	-
		305	31	53,5	-	-	16,5	-
17	Perancis (lignit)	17	-	40	-	-	-	5
18	Yunani	65-91	-	77-89	-	-	-	14-16
19	Indonesia (Kalimantan)	-	1,70	-	-	-	2,70	-

Keterangan : ttd = tidak terdeteksi

Pada Tabel 7 ditunjukkan perbandingan konsentrasi radionuklida NORM dalam beberapa jenis batubara, *bottom ash* dan *fly ash*. Bila kita tinjau konsentrasi NORM dalam *bottom ash*, maka diperoleh angka-angka antara 2-160 Bq/kg (U-238), 5-237 Bq/kg (Ra-226), 1,5 hingga 147 Bq/kg (Th-232) dan 158 – 1000 Bq/kg (K-40). Konsentrasi NORM dalam *fly ash* terkumpul, U-

238 antara 3-312 Bq/kg, Ra-226 antara 4-528 Bq/kg, Th-232 antara 2 hingga 170 Bq/kg dan K-40 berkisar antara 160 – 1200 Bq/kg. Konsentrasi NORM dalam *fly ash* yang lolos, U-238 antara 4-420 Bq/kg, Ra-226 antara 6-558 Bq/kg, Th-232 antara 2,2 hingga 170 Bq/kg dan K-40 berkisar antara 160 – 1300 Bq/kg.

Tabel 6. Kandungan dan konsentrasi radionuklida dalam *fly ash* PLTU batubara di beberapa negara^[2]

No.	Negara	Konsentrasi radionuklida (Bq/kg)							
		K-40	Ra-226	U-238	Pb-210	Po-210	Th-232	Th-228	Ra-228
1	Australia	ttd	520	ttd	ttd	ttd	ttd	ttd	ttd
2	Jerman	ttd	70-300	70-300	200-3000	300-5500	30-100	ttd	ttd
3	India	ttd	100	ttd	ttd	ttd	ttd	ttd	130
4	Italia:								
	I	80-1000	44-330	40-70	ttd	ttd	300	ttd	ttd
	II	-	37-74	-	-	-	-	-	333
	III	-	999	-	-	-	-	-	-
5	Hungaria	ttd	20-560	ttd	ttd	ttd	ttd	ttd	ttd
6	USA	260-270	15	200	160-630	250-700	100-160	100-120	100-160
	I	260-270	15	200	160-630	250-700	100-160	100-120	100-160
	II	-	161	-	-	-	-	-	84
	III	-	137	-	-	-	-	-	67
7	Rumania	500	113	71	206	240	59	70	-

Keterangan : ttd = tidak terdeteksi

Tabel 7. Kandungan dan konsentrasi radionuklida dalam beberapa jenis batubara, *bottom ash* dan *fly ash*^[2]

No	Radio-nuklida	Batubara coklat (Bq/kg)	Lignit (Bq/kg)	Batubara campuran (Bq/kg)	<i>Bottom ash</i> (Bq/kg)	<i>Fly ash</i> (Bq/kg)	
						terkumpul	lolos
1	U-238	7-101	1,5-96	1,1-112	2-160	3-312	4-420
2	Ra-226	1-91	8-152	4-120	5-237	4-528	6-558
3	Pb-210	-	-	-	-	10-500	11-510
4	Po-210	-	-	-	-	10-540	11-589
5	Th-232	30	10-35	1-43	1,5-147	2-170	2,2-170
6	Th-228	-	-	-	-	1,2-175	1-175
7	K-40	230-590	182-490	30-615	158-1000	160-1200	160-1300

Pada Tabel 8 ditunjukkan konsentrasi radionuklida NORM yang terlepas dari pengoperasian PLTU batubara.

Tabel 8. Konsentrasi radionuklida yang terlepas dari pengoperasian PLTU batubara 1000 MWe^[2]

Bentuk/Jenis	Aktifitas (Bq/tahun)
Gas	
1. Rn-222	$(0,30 - 8,14) \times 10^9$
Partikulat:	
1. K-40	$(0,20 - 28,70) \times 10^9$
2. U-238	$(0,06 - 0,30) \times 10^9$
Ra-226	$(0,04 - 51,70) \times 10^9$
U-234	$(0,06 - 0,30) \times 10^9$
Po-218	$(0,14 - 0,30) \times 10^9$
Pb-214	$(0,14 - 0,30) \times 10^9$
Po-214	$(0,14 - 0,30) \times 10^9$
Pb-210	$(0,14 - 0,30) \times 10^9$
Po-210	$0,30 \times 10^9$
Th-234	$0,30 \times 10^9$
Pa-234	$0,19 \times 10^9$
3. Th-232	$0,19 \times 10^9$
Th-228	$0,07 \times 10^9$
Tl-208	$0,19 \times 10^9$
Ac-228	$0,19 \times 10^9$
Bi-212	$(4,07 - 14,80) \times 10^9$
Rn-220	$0,19 \times 10^9$
Ra-224	$(0,19 - 3,5) \times 10^9$
Ra-228	$(0,09 - 3,5) \times 10^9$
Po-216	$(0,09 - 0,19) \times 10^9$

Dengan adanya gambaran data konsentrasi NORM dalam batubara, *bottom ash* dan *fly ash* dari beberapa negara seperti ditunjukkan dalam Tabel 5, 6, 7 dan 8 tersebut dapat diketahui bahwa konsentrasi NORM berada jauh di atas *background* alamiah calon tapak PLTU

Kramatwatu. Pada Tabel 9 ditunjukkan adanya kelipatan antara 1 – 56 kali lipat antara konsentrasi alamiah (*background*) terhadap konsentrasi dalam *bottom ash* dan *fly ash* hasil pengoperasian PLTU batubara.

Tabel 9. Perbandingan konsentrasi NORM daerah kajian terhadap konsentrasi NORM dalam *bottom ash* dan *fly ash* dari pengoperasian PLTU batubara

Radio-nuklida	TN-1 (Bq/kg)	TN-2 (Bq/kg)	TN-3 (Bq/kg)	TN-4 (Bq/kg)	<i>Bottom ash</i> (Bq/kg)	<i>Fly ash</i> (Bq/kg)		Kelipatan
						ter-kumpul	lolos	
K-40	34,24	29,56	28,84	23,28	158-1000	160-1200	160-1300	5-56 kali
Ra-226	40,54	37,12	32,76	32,02	5-237	4-528	6-558	1-17 kali
Th-232	17,92	19,46	20,04	26,02	1,5-147	2-170	2,2-170	1-10 kali

KESIMPULAN

Dilihat dari nilai rata-rata radiasi dan konsentrasi K-40, Ra-226 dan Th-232 menunjukkan nilai radiasi dan konsentrasi yang masih rendah dan belum melampaui batasan NORM yang harus diintervensi yaitu sebesar 1 Bq/g (1 kBq/kg) bagi Ra-226 dan Th-232, dan 10 Bq/g (10 kBq/kg) bagi K-40. Kecenderungan konsentrasi K-40, Ra-226 dan Th-232 dalam

tanah di lokasi pengukuran calon tapak PLTU (lokasi TN-1 dan lokasi TN-2) serta di luar calon tapak PLTU (lokasi TN-3 dan TN-4) relatif sama, dan menurut ketentuan peraturan perundangan masih relatif jauh di bawah ambang batas, sehingga tidak perlu dilakukan intervensi lebih lanjut. Data hasil pengukuran radiasi dan konsentrasi NORM di wilayah calon tapak PLTU Kramatwatu dan sekitarnya menunjukkan nilai rona lingkungan yang bersifat latar

(background). Radionuklida NORM yang paling dominan dijumpai dalam batubara, *bottom ash* dan *fly ash* adalah K-40, Ra-226 dan Th-232 dengan nilai konsentrasi yang relatif jauh di atas latar (background) alamiah.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kami sampaikan kepada pimpinan PTLR atas ijinnya, pendamping dan tim *survey* dari ERM serta beberapa staf dan pengamanan setempat yang telah mendampingi untuk berlangsungnya *survey* ini. Ucapan terima kasih juga kami sampaikan kepada Bapak Chevy Cahyana dan kawan-kawan dari Laboratorium Lingkungan PPIKSN atas bantuan analisis sampelnya.

DAFTAR PUSTAKA

1. Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup RI NO. 05 Tahun 2012 tentang Jenis Rencana Usaha dan/atau Kegiatan Yang Wajib Memiliki Analisis Mengenai Dampak Lingkungan Hidup.
2. Melawati, J., Kajian Dampak Lepasannya Radionuklida dari Pengoperasian PLTU Batubara dan PLTN ke Lingkungan, Iptek Nuklir : Bunga Rampai Presentasi Ilmiah Jabatan Peneliti, BATAN, Jakarta.
3. Peraturan Pemerintah RI No. 33 Tahun 2007 tentang Keselamatan Radiasi Pengion dan Keamanan Sumber Radioaktif.
4. Peraturan Kepala BAPETEN No. 9 Tahun 2009 tentang Intervensi terhadap Paparan yang Berasal dari *Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Material*.
5. Kathren, R.L., NORM Sources and Their Origins, *Appl. Radiat. Isot.*, Vol. 49 No. 3, Elsevier Science Limited, 1998.
6. Sohrabi, M., The State of the Art on Worldwide Studies in Some Environments with Elevated NORM, *Appl. Radiat. Isot.*, Vol. 49 No. 3, Elsevier Science Limited, 1998.
7. Paschoa, A.S., Potential Environment and Regulatory Implications of NORM, *Appl. Radiat. Isot.*, Vol. 49 No. 3, Elsevier Science Limited, 1998.
8. Heaton, B., Field Survey Instrumentation and Radioanalytical Procedures for NORM, *Appl. Radiat. Isot.*, Vol. 49 No. 3, Elsevier Science Limited, 1998.
9. Hipkin, J., Paynter, R.A. and P.V. Shaw, Exposures at Work to Ionizing Radiation Due to the Use of NORM in Industrial Processes, *Appl. Radiat. Isot.*, Vol. 49 No. 3, Elsevier Science Limited, 1998.
10. Smith, D.M. and P. Kemball, Regulatory Control and NORM, *Appl. Radiat. Isot.*, Vol. 49 No. 3, Elsevier Science Limited, 1998.
11. Bhattacharyya, D.K., Issues in the Disposal of Waste Containing NORM, *Appl. Radiat. Isot.*, Vol. 49 No. 3, Elsevier Science Limited, 1998.
12. O'Brien, R.S. and M.B. Cooper, TENORM : Pathway Analysis and Radiological Impact, *Appl. Radiat. Isot.*, Vol. 49 No. 3, Elsevier Science Limited, 1998.
13. Carlyle, J., etc., Disposal Options and Case-study Analysis, *Appl. Radiat. Isot.*, Vol. 49 No. 3, Elsevier Science Limited, 1998.
14. Hutchinson, D.E. and L.F. Toussaint, Near Surface of Concentrated NORM Wastes, *Appl. Radiat. Isot.*, Vol. 49 No. 3, Elsevier Science Limited, 1998.
15. Peraturan Pemerintah RI No. 61 Tahun 2013, tentang Pengelolaan Limbah Radioaktif (2013).
16. NORM Waste Management Technical Committee, Technical Report on the Management of Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) in Waste (2005).
17. Simopoulos, S.E. & M.G. Angelopoulos, Naturally Radioactivity Release from Lignite Power Plants in Greece, *Journal Environmental Radioactivity* 5 (1987).
18. Heni, Studi Potensi Peningkatan Paparan Unsur Radioaktif Alam Akibat Pembakaran Batubara, *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, BATAN, Vol. 7 No. 2 Desember (2005).
19. A.S. Arief, Melawati, J. & K. Santoso, Tingkat Radioaktivitas Radionuklida Primordial ^{238}U dan ^{232}Th di Lingkungan Tambang Batubara Terbuka. Prosiding Seminar Keselamatan Radiasi dan Lingkungan XI, Jakarta (2005).
20. T. Ren, Comparative Health Risk Assessment of Nuclear Power and Coal Power in China. *Journal Radiological Protection* Vol. 18 (1998).

PERHITUNGAN JUMLAH LIMBAH PASKA DEKOMISIONING REAKTOR TRIGA MARK II BANDUNG

Sutoto, Kuart Heriyanto, Mulyono Daryoko

Pusat Teknologi Limbah Radioaktif-Badan Tenaga Nuklir Nasional
Kawasan Puspiptek Serpong Gedung 50, Tangerang Selatan, Banten 15310

E-mail: daryoko@batan.go.id

ABSTRAK

Perhitungan jumlah limbah paska dekomisioning Reaktor Triga Mark II Bandung. Reaktor Triga Mark II, Bandung mulai dioperasikan pada tahun 1965 pada daya 250 kW. Pada tahun 1971 daya reaktor ditingkatkan menjadi 1000 kW. Pada tahun 1996 operasi reaktor diberhentikan untuk ditingkatkan dayanya menjadi 2000 kW dan selesai pada tahun 2000, dan dilakukan komisioning kembali pada tahun 2001. Karena umurnya sudah relatif tua, maka perencanaan dekomisioning harus telah disiapkan. Tahap awal yang harus dilakukan adalah inventarisasi radionuklida yang terkandung pada komponen-komponen inti reaktor dan sekitarnya. Ada perhitungan ini digunakan computer code ORIGEN 2, sehingga bisa diperkirakan secara kualitatif maupun kuantitatif kategori radionuklida pada masing-masing komponen tersebut, apakah termasuk limbah radioaktif aktivitas sangat rendah atau dibawah clearance level, limbah radioaktif aktivitas rendah, dan limbah radioaktif aktivitas sedang. Kesimpulan yang diperoleh adalah perkiraan inventarisasi limbah hasil dekomisioning reaktor Triga Mark II pada komponen utama adalah limbah aktivitas rendah lebih kurang 104,955 ton (15, 21%), limbah aktivitas sedang lebih kurang 37,847 ton (5,60%) dan limbah aktivitas sangat rendah atau di bawah clearance level lebih kurang 533,600 ton (78,89%).

Kata Kunci : jumlah, limbah, Triga Mark II, Bandung

ABSTRACT

WASTE INVENTORY FROM DECOMMISSIONING OF TRIGA MARK II REACTOR, BANDUNG. Assessment of waste inventory calculation results from decommissioning of Triga Mark II reactor Bandung has been carried out. Triga Mark II reactor Bandung started operation in 1965 on the power of 250 kW. In 1971, the reactor power was increased to 1000 kW. In 1996 dismissed the reactor operation to be upgraded to year of 2000 kW and was completed in year of 2000, and commissioning is done back in year of 2001. Due to relatively old age, then the decommissioning plan should have been prepared. The initial phase is to do an inventory of radionuclides contained in the components of the reactor core and its surroundings. This inventory was used a computer code ORIGEN 2, so that it can be qualitatively and quantitatively estimated radionuclide categories in each of these components, including radioactive waste activity is very low or below the clearance levels, low level activity radioactive waste, and intermediate level radioactive waste. The conclusion is obtained the estimation of waste inventory from the decommissioning of main component revealed that of Triga Mark II reactor, i.e: the low level activity waste approximately 104.955 tons (15, 21%), the intermediate level waste activity is approximately 37.847 tons (5.60%) and very low activity waste or below the clearance level is approximately 533.600 tons (78.89%).

Keywords : inventory , waste , Triga Mark II, Bandung

PENDAHULUAN

Reaksi neutron dengan bahan bakar nuklir akan menghasilkan tiga kelompok radionuklida, yaitu produk aktivasi, aktinida dan produk fisi[1,2,3]. Unsur-unsur kimia yang terdapat pada komponen-komponen di sekitar reaktor (komponen utama), seperti beton, reflektor, *biological shielding*, *lazy susan*, *bellow*, *beam port*, *fuel rack*, *grid*, sistem pendingin primer (Gambar 1), juga mengalami reaksi aktivasi, sehingga komponen-komponen tersebut menjadi radioaktif. Pada Tabel 1 disajikan nuklida awal yang teraktivasi dan hasil aktivasinya. Disamping terjadinya reaksi aktivasi, komponen-komponen tersebut juga bisa

terkontaminasi radionuklida-radionuklida yang berasal dari reaksi aktivasi, hasil fisi maupun aktinida dari bahan bakar uranium[1,2,3,4].

Di bawah ini dijelaskan kemungkinan terjadinya radionuklida pada komponen-komponen utama ini:

1. Aktivasi

Hasil aktivasi komponen-komponen utama ini antara lain adalah: ^{55}Fe , ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{63}Ni , ^{94}Nb , ^{133}Ba , ^{152}Eu dan ^{154}Eu yang berasal dari nuklida: ^{54}Fe , ^{55}Mn , ^{59}Co , ^{62}Ni , ^{93}Nb , ^{132}Ba , ^{161}Eu dan ^{153}Ru .

2. Kontaminasi dari produk fisi.

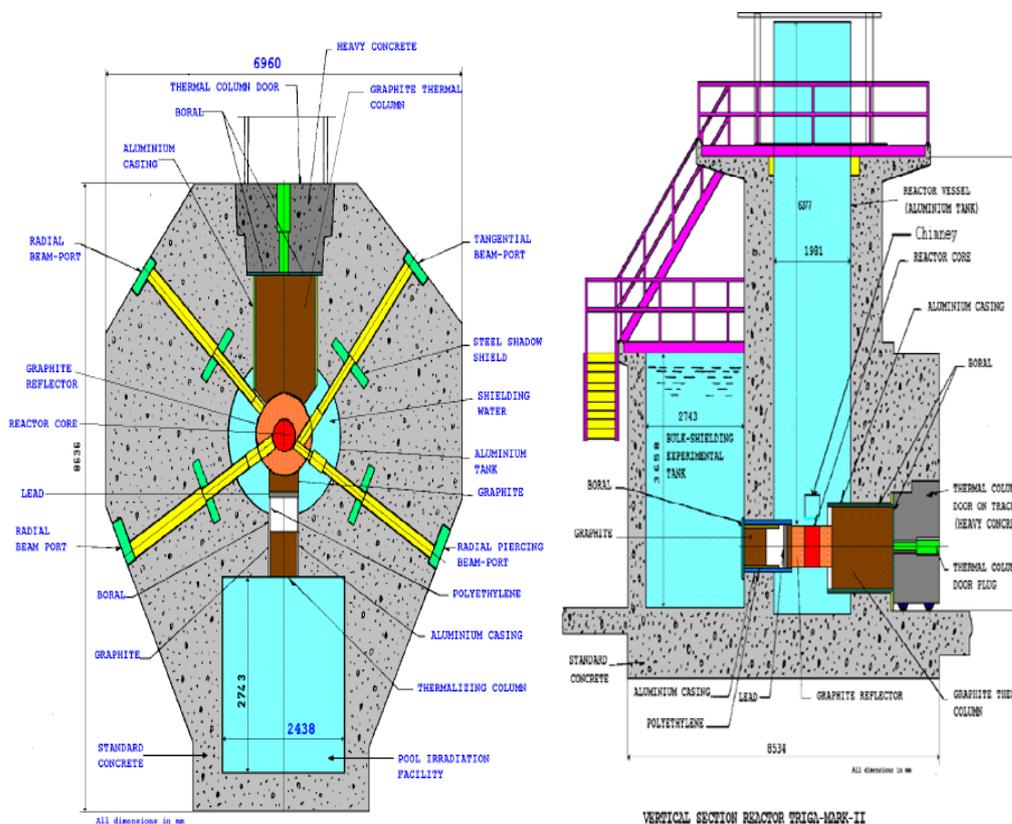
Kontaminasi hasil fisi secara umum ada 2 macam: *loose contamination*, yaitu kontaminasi yang hanya terjadi pada

permukaan luar dan mudah didekontaminasi, dan *fixed contamination*, yang lebih sulit untuk dilakukan dekontaminasi. Kontaminasi ini bisa merupakan produk fisi, atau hasil *leaching* dari produk aktivasi dan aktinida yang terbawa oleh aliran air pendingin. Radionuklida yang penting dari produk fisi adalah: ^{90}Sr , ^{99}Tc , ^{106}Ru , ^{129}I , ^{137}Cs , ^{154}Ce , dari aktinida adalah: ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{241}Pu , ^{241}Am , ^{242}Cm , ^{244}Cm , dan dari isotop uranium adalah: ^{232}U , ^{233}U , ^{234}U , ^{235}U , ^{236}U dan ^{239}U [1]. Namun karena yang terjadi pada komponen utama ini adalah *loose contamination*, dan mudah didekontaminasi sebelumnya, maka dianggap bahwa kontaminasi dari produk fisi ini tidak

berpengaruh terhadap kandungan radionuklida pada komponen-komponen utama ini.

Bilamana inventarisasi radionuklida pada komponen-komponen utama tersebut telah diketahui, dan masing-masing diketahui aktivitasnya maka kemudian limbah radioaktif pada komponen tersebut bisa dipetakan, termasuk akan diketahui juga apakah limbah tersebut limbah radioaktif tingkat sangat rendah atau di bawah *clearance level*, tingkat rendah, sedang atau tinggi.

Penelitian ini ditujukan untuk menganalisis kandungan radionuklida pada bahan komponen-komponen utama tersebut, dan kemudian menganalisis limbah radioaktifnya.



Gambar 1. Reaktor Triga Mark II, Bandung (penampang horisontal dan vertikal) [2,6]

METODOLOGI

Peralatan dan bahan

Dalam kegiatan ini diperlukan data-data yang berasal dari pustaka, software ORIGEN 2 dan data dari peninjauan langsung di lapangan dengan objek Reaktor Triga Mark II Bandung.

Metode

1. Inventarisasi radionuklida pada material-material inti reaktor dan sekelilingnya

Pada inventarisasi ini radionuklida dilakukan dengan menggunakan data-data sekunder dari berbagai pustaka dari data hasil peninjauan langsung di lapangan seperti material komponen, fungsi komponen, sejarah pengoperasian, *effective full power years (EFPY)*, daya, flux, jarak antara waktu *shutdown*

dengan waktu dekomisioning, dan berat komponen. Dengan data tersebut maka dapat diestimasi peta radionuklida pada masing-masing

material tersebut. Inventarisasi radionuklida ini dilakukan dengan menggunakan *computer code ORIGEN 2*.

Tabel 1. Nuklida Asal, Nuklida Hasil, Pancaran Nuklida Hasil dan Umur Parohnya[3]

Nuklida asal	Partikel sinar penembak dan yang dihasilkan	Nuklida hasil	Sinar dan partikel yang dipancarkan nuklida hasil	Umur paroh nuklida hasil (tahun)	Kelimpahan nuklida dalam unsur (%)
Li-6	n, α	H-3	β^-	12.3	7.5
C-13	n, γ	C-14	β^-	5730	1.1
N-14	n, p	C-14	β^-	5730	99.6
Na-23	n, 2n	Na-22	β^+ , EC	2.6	100
Na-23	γ , n	Na-22	β^+ , EC	2.6	100
Cl-35	n, γ	Cl-36	β^- (β^+ , EC)	301000	75.8
K-39	n, p	Ar-39	β^-	269	93.3
Ca-40	n, γ	Ca-41	EC	103000	96.9
Fe-54	n, p	Mn-54	EC, γ	0.86	5.9
Mn-55	n, 2n	Mn-54	EC, γ	0.86	100
Fe-54	n, γ	Fe-55	EC, X	2.7	5.9
Ni-58	n, γ	Ni-59	EC, X	76000	68.3
Ni-62	n, γ	Ni-63	β^-	100	3.6
Co-59	n, γ	Co-60	β^- , γ	5.3	100
Zn-64	n, γ	Zn-65	EC, β^+	0.67	48.6
Zr-92	n, γ	Zr-93	β^-	1500000	17.1
Mo-92	n, γ	Mo-93	EC, X	3500	14.8
Nb-93	n, γ	Nb-93m	IT, X	15.8	100
Nb-93	n, γ	Nb-94	β^- , γ	20000	100
Mo-94	n, p	Nb-94	β^- , γ	20000	9.3
Mo-98	n, γ	Tc-99	β^-	213000	24.1
Ag-107	n, γ	Ag-108m	EC, γ	130	51.8
Ag-109	n, γ	Ag-110m	β^- , γ	0.68	48.2
Sn-124	n, γ	Sb-125	β^- , γ	2.76	5.8
Ba-132	n, γ	Ba-133	EC, X, γ	10.5	0.1
Eu-151	n, γ	Eu-152	EC, X, β^- , γ	13.5	47.8
Eu-153	n, γ	Eu-154	β^- , γ , X	8.6	52.2
Eu-154	n, γ	Eu-155	β^- , γ , X	4.76	0
Ho-165	n, γ	Ho-166m	β^- , γ , X	1200	100

2. Estimasi kualitatif dan kuantitatif limbah radioaktif pada material-material inti utama

Berdasarkan peta radionuklida pada masing-masing material, kemudian data-data tersebut dijumlahkan maka akan bisa terlihat, baik kualitatif maupun kuantitatif limbah dari masing-masing material tersebut.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Inventarisasi radionuklida pada material-material inti reaktor dan sekelilingnya

EFPY reaktor Triga Mark II Bandung dicari dari berbagai pustaka, dan kemudian

dilakukan diskusi dengan manajemen dan operator reaktor Triga Mark II, Bandung dengan menggali log book operasinya, maka diperoleh data-data sbb.:

1. tahun 1965 - 1971 dengan daya 250 kW, EFPY = 2 tahun
2. tahun 1971 - 1996 dengan daya 1 MW, EFPY = 6,68 tahun
3. tahun 2001 – sekarang dengan daya 2 MW, EFPY = 0,68 tahun

Data-data flux dari berbagai komponen reaktor Kartini (Triga Mark II) dengan daya 100 kW, seperti terlihat pada Tabel 2. Data-data flux reaktor Triga Mark II Bandung dapat diturunkan dari data-data flux reaktor Kartini, dengan harga flux yang berbanding lurus dengan dengan daya

reaktor Kartini [1]. Sebagai contoh harga flux reflektor reaktor Triga Mark II, Bandung (1 MW)
 $= 1000/100 \times 2,578E+11 = 2,578E+12$.

Demikian pula dengan komponen-komponen yang lain.

Tabel 2. Data flux pada komponen-komponen reaktor Kartini (daya 100kW)

No	komponen	fluks netron
1	<i>grade plate core</i>	8,716E+11
2	<i>Reflector</i>	2,578E+11
3	<i>Lazy susan</i>	2,578E+11
4	<i>Beamport</i>	
	<i>Inner part</i>	1,727E+10
	<i>Outer part</i>	1,290E+08
5	<i>Tank</i>	2,290E08
6	<i>Thermal column dry</i>	
	<i>Inner part</i>	1,727E+10
	<i>Outer part</i>	2,290E+08
7	<i>Thermal column wet</i>	
	<i>Inner part</i>	1,727E+10
	<i>Outer part</i>	2,290E+08
8	<i>Detector column</i>	1,727E+10
9	<i>Control rod column</i>	1,115E+12
10	<i>Supporting core</i>	1,727E+10
11	<i>Supporting leg core</i>	2,290E+08
12	<i>Shielding reactor</i>	<2E+08

Komposisi unsur dari masing-masing komponen dicari dari berbagai pustaka, yang akhirnya didapatkan data-data. Sebagai contoh komposisi

pada komponen grafit[1], seperti terlihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Komposisi grafit

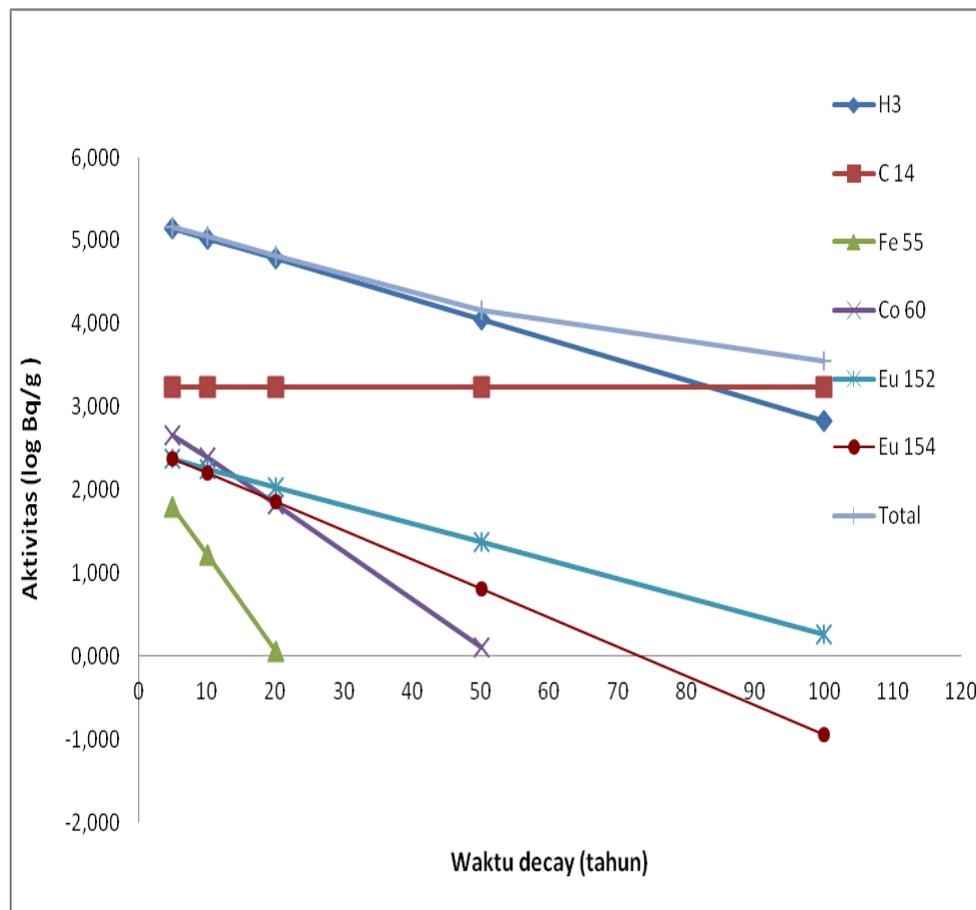
Bahan	Unsur	Konsentrasi (ppm)
<i>Graphite</i>	<i>Lithium</i>	0,1
	<i>Carbon</i>	10 ⁶
	<i>Nitrogen</i>	4
	<i>Chlorine</i>	4,3
	<i>Calcium</i>	41
	<i>Iron</i>	4,3
	<i>Cobalt</i>	0,012
	<i>Nickel</i>	3,65
	<i>Niobium</i>	1
	<i>Silver</i>	0,01
	<i>Tin</i>	0,05
	<i>Barium</i>	1
	<i>Samarium</i>	0,02
	<i>Europium</i>	6 x 10 ⁻⁴
	<i>Mercur</i>	0,04
<i>Uraniu</i>	0,1	

Dari data-data yang didapat pada masing-masing komponen di atas (EFPY, flux, komposisi dan berat masing-masing komponen), dengan ORIGEN 2 akan diperoleh inventarisasi radionuklida pada komponen inti reaktor dan sekitarnya (reflektor, *thermal column*, *thermalizing column*, *biological shielding*, *Control Rod Column*, *Detector Column*, *Grid Plate*, *Supporting Core*, *Supporting Leg Thermal Column Core*, Tangki Reaktor, *Lazy Susan*, *Beam Port*). Pada perhitungan ini disumsikan dekomisioning dilakukan 5 tahun setelah *shut down*.

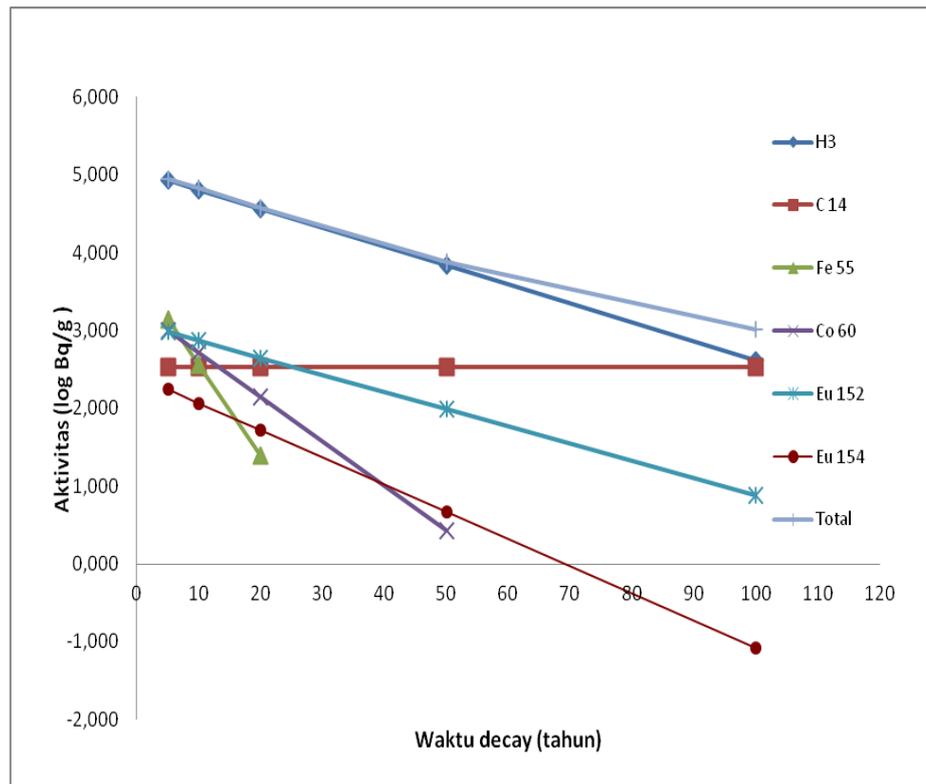
Sebagai contoh data salah satu komponen utama (reflektor) yang sekarang terpasang dimulai pemakaiannya sejak reaktor diupgrade pada tahun 2001 dengan daya 2 MW, sedangkan reflektor yang sekarang dilimahkan digunakan sejak tahun 1971 sampai dengan tahun 1996, dengan daya 1 MW. Oleh karena itu dalam perhitungan ini kedua reflektor tersebut dipisahkan. Perhitungan lapisan aluminium pada reflektor dilakukan secara terpisah juga. Reflektor terbuat dari grafit yang dilapisi

aluminium berfungsi untuk merefleksikan flux ke arah column (*thermal column* dan *thermalizing column*). Perhitungan inventarisasi radionuklida pada reflektor, dianggap merata untuk seluruh reflektor. Kandungan radionuklida yang terdapat di dalam reflektor adalah H-3, C-14, Fe-55, Co-60, Eu-152 dan Eu-154, dengan jumlah radionuklida pada operasi pertama 1 MW adalah $1,0 \times 10^4$ Bq/gram, sedangkan aktivitas reflektor pada operasi 2 MW adalah $9,0 \times 10^3$ Bq/gram. Kandungan radionuklida pada lapisan aluminium adalah Al-28, Fe-55, Co-60, Ni-63 dan Zn-65, dengan aktivitas pada operasi reaktor dengan daya 1 MW adalah $7,0 \times 10^3$ Bq/gram, sedangkan aktivitas pada daya 2 MW adalah $2,0 \times 10^5$ Bq/gram. Hasil dari inventarisasi reflektor tersebut bisa dilihat pada Gambar 2 dan Gambar 3.

Dengan cara seperti itu, maka inventarisasi radionuklida seluruh komponen-komponen utama bisa diketahui, seperti yang terlihat pada Gambar 4.



Gambar 2. Hasil inventarisasi radionuklida reflector dengan daya 2 MW



Gambar 3. Hasil inventarisasi radionuklida reflektor dengan daya 1 MW

Dari Gambar 4, maka aktivitas total dan aktivitas spesifiknya (Bq/g). dari masing-masing unsur pada masing-masing komponen bisa diketahui, dengan menganggap inventarisasi ini dilakukan pada saat 5 tahun setelah *shut down*. Kemudian

pada Gambar 5 adalah klasifikasi limbah radioaktif dan jumlahnya apakah dibawah *clearance level (free release)*, limbah aktivitas rendah (*low level waste*), atau limbah aktivitas sedang (*intermediate level waste*).

Tabel 4. Aktivitas radionuklida komponen- komponen utama

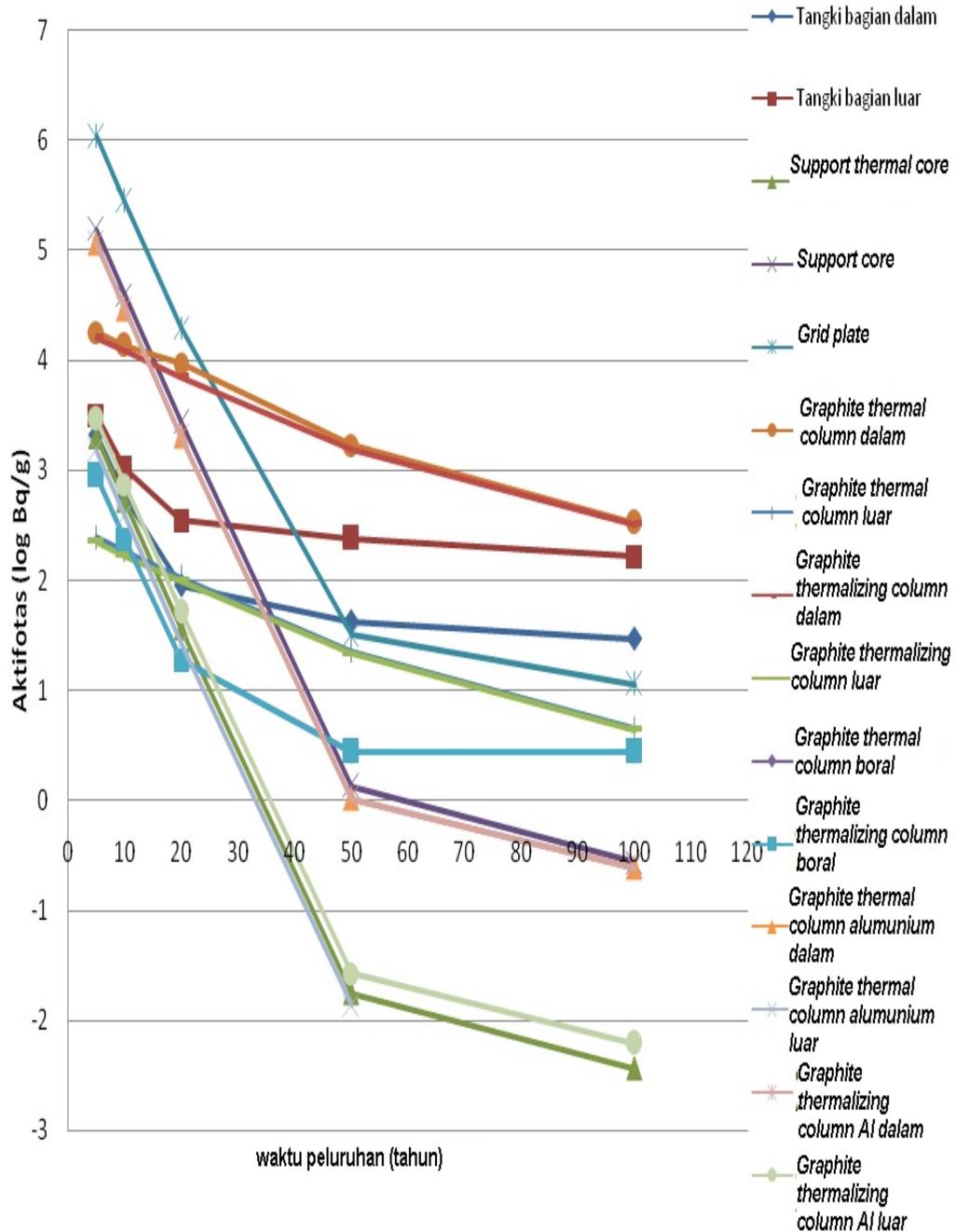
komponen	berat, kg	aktivitas total, bq	aktivitas spesik, bq/g
grafit	6.519	223.193	34.235
baja tahan karat	355	3.563.011	10.030.246
aluminium	2.528	312.455	123.575
beton	667.000	1.017.035	1.524
jumlah	676.402		

Tabel 5. Klasifikasi limbah radioaktif

komponen	dibawah <i>clearance level</i>	LLW, kg	ILW,kg
grafit	-	3.259	3.259
baja tahan karat	-	355	-
aluminium	-	1.645	882
beton	533.600	100.050	33.350
jumlah	533.600	104.955	37.847

Seperti terlihat pada data-data di atas maka perkiraan inventarisasi limbah hasil dekomisioning reaktor Triga Mark II pada komponen utama setelah 5 tahun *shut down* adalah limbah aktivitas rendah lebih kurang 304,955 ton (15, 21%), limbah aktivitas sedang lebih kurang 37,847 ton (5,60%) dan limbah aktivitas sangat rendah atau di bawah *clearance level* lebih kurang 533,600 ton (78,89%).

Data inventarisasi limbah ini sangat penting untuk memperkirakan biaya dekomisioning reaktor Triga Mark II, Bandung, khususnya untuk biaya pengelolaan limbah dan biaya dismantling. Biaya dekomisioning ini pada tahap awal sangat diperlukan untuk mempersiapkan pendanaannya.



Gambar 4. Hasil inventarisasi radionuklida pada komponen-komponen utama

KESIMPULAN

Dari penelitian ini bisa disimpulkan bahwa perkiraan inventarisasi limbah hasil dekomisioning reaktor Triga Mark II pada komponen utama setelah 5 tahun *shut down* adalah limbah aktivitas rendah lebih kurang 304,955 ton (15, 21%), limbah aktivitas sedang lebih kurang 37,847 ton (5,60%) dan limbah aktivitas sangat rendah atau di bawah *clearance level* lebih kurang 533,600 ton (78,89%). Dari data inventarisasi ini dapat diperkirakan biaya dan dana yang disiapkan untuk dekomisioningnya.

DAFTAR PUSTAKA

1. International Atomic Energy Agency (2002), *Radiological Characterization of Shut Down Nuclear Reactor for Decommissioning Purposes*, IAEA-TRS No. 389, Vienna.
2. Daryoko, M., and Saryati (2007), *Radiological Characterization analysis of Graphite Reflector for Waste Management Policy*, MIPA, UGM.
3. Daryoko, M., and Gunandjar (2003), *Inventarisasi Radionuklida dalam Komponen Nuklir*, Jurnal Teknologi Pengolahan Limbah, ISSN 1410-9565, Volume 6 Nomor 1, Jakarta.
4. International Atomic Energy Agency, "Decommissioning Techniques for Research Reactor", Final Report of a Coordinated Research Project, 1997-2001, IAEA-TECDOC-1273, Vienna, 2002
5. International Atomic Energy Agency (2009), *Research Reactor Modernization and Refurbishment, Upgrade of the Bandung Triga 2000 Reactor*, IAEA-TECDOC-1625, Vienna (2009).
6. Anonymous, *Reaktor Triga 2000 Bandung*, Available: <http://airamadhan.wordpress.com/2008/05/27/reaktor-triga-2000-bandung/> diakses pada 7 November 2011.
7. Peraturan Pemerintah (PP) Republik Indonesia No. 61 Tahun 2013 tentang Pengolahan Limbah Radioaktif.

FENOMENA DISTRIBUSI RADIONUKLIDA KONTAMINAN PADA AIR KANAL FASILITAS KH-IPSB3 PASCA PERBAIKAN FILTER SKIMER

Titik Sundari, Darmawan Aji, Arifin

Pusat Teknologi Limbah Radioaktif - Badan Tenaga Nuklir Nasional
Kawasan Puspiptek Serpong Gedung 50, Tangerang Selatan, Banten 15310
E-mail: titiks@batan.go.id

ABSTRAK

FENOMENA DISTRIBUSI RADIONUKLIDA KONTAMINAN PADA AIR KANAL FASILITAS KH-IPSB3 PASCA PERBAIKAN FILTER SKIMER. Kolam IPSB3 sampai saat ini baru digunakan untuk menyimpan sementara bahan bakar nuklir bekas dari Reaktor Serba Guna GA. Siwabessy, sedangkan kanal hubung digunakan untuk transfer bahan bakar nuklir bekas maupun material teriradiasi lainnya baik dari IRM dan IPR (PT. INUKI). Kolam dan kanal berisi air pendingin yang juga berfungsi untuk menahan radionuklida dari BBNB untuk menghindari lepasan radionuklida ke lingkungan. Kualitas air kolam dan kanal dijaga dengan mengoperasikan sistem purifikasi/pemurnian air dengan resin penular ion dan pemurnian air permukaan dengan alat filter skimer yang dioperasikan secara terapan dan dapat dipindahkan. Evaluasi yang dilakukan yaitu kadar radionuklida di air permukaan air kanal dibandingkan dengan kain filter skimer penyaringnya di kanal hubung. Hal ini diperlukan karena setelah adanya kerusakan filter skimer dan tidak beroperasi selama 18 Nopember 2015 sampai dengan 10 Mei 2016, permukaan air kanal terlihat kotor dengan debris yang menggumpal dan melayang di air permukaan. Sampel air permukaan dan kain filter penyaringnya kemudian dianalisis kandungan radionuklidanya menggunakan spektrometri gamma. Dari hasil analisis radionuklida dalam air permukaan menunjukkan adanya kontaminasi radionuklida I-133 di 2 titik, dan I-132 di 1 titik, dengan konsentrasi tertinggi I-133 sebanyak $2,7 \times 10^{-4} \mu\text{Ci/ml}$. Hasil analisis radionuklida dalam air kanal hubung di bagian dalam juga menunjukkan radionuklida I-133 dengan konsentrasi sebanyak $5,86 \times 10^{-5} \mu\text{Ci/ml}$. Sedangkan hasil analisis kain filter yang digunakan untuk pemurnian dengan penyaringan air permukaan dideteksi adanya radionuklida Cs-137 dan Co-60 saja dengan aktivitas masing-masing $1,44 \times 10^{-2}$ dan $2,00 \times 10^{-3} \mu\text{Ci}$. Hal ini kemungkinan karena radionuklida Cs-137 dan Co-60 yang awalnya di bawah batas deteksi alat analisis, terakumulasi dalam kain filter skimer karena memiliki kecenderungan menempel pada kotoran/debris yang melayang di permukaan air kanal hubung. Sedangkan radionuklida I-133 dan I-132 yang terdeteksi di permukaan air maupun bagian dalam air kanal hubung tidak terdeteksi di kain filter dimungkinkan karena aktivitasnya yang sudah meluruh karena mempunyai waktu paro pendek berturut-turut yaitu 20 jam dan 137 menit. Dari evaluasi ini juga dapat disimpulkan bahwa pengoperasian filter skimer untuk pemurnian air permukaan di kanal hubung sangat besar pengaruhnya dalam memurnikan air kanal hubung secara keseluruhan karena radionuklida kontaminan berumur panjang yaitu Cs-137 dan Co-60 yang merupakan parameter penting kualitas air kanal dapat terakumulasi di kain filter skimer.

Kata Kunci : BBNB, KH-IPSB3, analisis radioaktivitas, air permukaan kanal, kain filter skimer.

ABSTRACT

DISTRIBUTION PHENOMENON RADIONUCLIDE CONTAMINANTS IN WATER CHANNEL OF TC-ISSF AFTER SKIMER FILTER ADJUSTMENT. ISSF pond storage now only used to temporarily store spent nuclear fuel from Multipurpose Reactor GA. Siwabessy, while the circuit channels used to transfer spent nuclear fuel and other irradiated material both IRM and IPR (PT. Inuki). Pond and canal filled with water cooling which also serves to hold radionuclides from BBNB to avoid detachment of radionuclides into the environment. Water quality in pond and canal maintained by operating a system of purification / purification of water with an ion exchange resin and the surface water purification filter skimer operated floating and moveable. Evaluations were done that the levels of radionuclides in surface water canal water compared with filters cloth skimer in the canal. This is necessary because once the damage skimer filter and do not operate from 18 November 2015 until May 10, 2016, the surface of the canal water looks dirty with debris and floated on the water surface. Surface water samples and filter cloth then analyzed the content of radionuclides using gamma spectrometry. From the analysis of radionuclides in surface water showed contamination radionuclides I-133 at two points, and I-132 at one point, with the highest concentration of I-133 as much as $2.7 \times 10^{-4} \mu\text{Ci} / \text{ml}$. The results of the analysis of radionuclides in water circuit in the inside channels also showed radionuclide I-133 at a concentration as much as $5,86 \times 10^{-5} \mu\text{Ci} / \text{ml}$. While the results of the analysis of filters cloth used for water purification, filtration surface detected radionuclides Cs-137 and Co-60 course with the activities of each of 1.44×10^{-2} and $2.00 \times 10^{-3} \mu\text{Ci}$. This is likely because the radionuclides Cs-137 and Co-60 were initially below the detection limit of analysis tools, accumulates in the filter cloth skimer because it has a tendency to stick to the dirt / debris that float on the surface of the canal water. While the radionuclide I-133 and I-132 were detected on the surface of the water and the inside of the canal water circuit is not detected in the filter cloth is possible, as the activity that has been decaying because it has a short half time that is 20 hours and 137 minutes. From this evaluation also concluded that operation of the filter skimer for the purification of surface water in the canal circuited has a great

effect in purifying the water channel circuit as a whole because of radionuclide contaminants long-lived that Cs-137 and Co-60 is an important parameter of quality canal water can accumulate in skimer filter cloth.

Keywords: SNF, TC-ISSF, radioactivity analysis, surface water canals, skimer filter cloth.

PENDAHULUAN

Pada operasi Reaktor Serba Guna GA. Siwabessy (RSG-GAS), bahan bakar nuklir dikeluarkan dari reaktor setelah mencapai nilai ekonomisnya, dan menjadi bahan bakar nuklir bekas (BBNB). Bahan Bakar Nuklir Bekas (BBNB) mengandung radionuklida (unsur radioaktif) yaitu: sisa uranium (U), trans-uranium (TRU), dan radionuklida dari produk fisi, serta produk teraktivasi lainnya. BBNB menghasilkan panas dan radiasi peluruhan radionuklida, yang disimpan dalam kolam reaktor sementara untuk pendinginan selama minimal 100 hari. BBNB dipindahkan ke Instalasi Penyimpanan Sementara Bahan Bakar Nuklir Bekas (IPSB3) melalui Kanal Hubung (KH) yang berisi air dan kemudian BBNB diletakkan pada rak di posisi lantai kolam IPSB3. Dalam hal ini air berfungsi sebagai *shielding* untuk mengurangi paparan radiasi selama pemindahan BBNB.

Kualitas air kolam dan kanal merupakan parameter yang sangat penting untuk dipantau karena air tersebut kontak langsung dengan BBNB yang disimpan. Kontaminasi zat radioaktif dalam air kolam dan kanal dicegah untuk keselamatan pekerja, peralatan, dan lingkungan. Untuk menjaga kualitas air kolam dan kanal, dilakukan operasi sistem purifikasi air dengan menggunakan sistem penukar ion yang mampu menyerap unsur-unsur radionuklida dan ion-ion pengotor lainnya yang terdapat di dalam air. Sistem purifikasi air ini mempunyai input dari bagian dalam air kolam maupun kanal, sementara ketinggian air kolam dan kanal adalah sekitar 6,35 m. Sistem purifikasi ini kurang optimal untuk menyerap kotoran atau debris yang terdapat di permukaan air, sehingga dilakukan operasi filter skimer yang khusus untuk memurnikan air permukaan. Prinsip kerja dari filter skimer yaitu dengan beroperasi secara terapung, menyedot air permukaan menggunakan pompa kemudian dimasukkan ke dalam kain filter yang berbentuk kantong sehingga kotoran/debris permukaan air akan menempel di bagian dalam kain filter, sedangkan air bersih akan meresap keluar kembali ke kolam/kanal. Filter skimer ini dapat dipindahkan untuk menjangkau setiap permukaan air terdapat kotoran/debris. Mulai pada tanggal 18 Nopember 2015, filter skimer kanal hubung terjadi kerusakan bagian pompa sehingga tidak dapat beroperasi memurnikan air kanal hubung. Filter skimer ini kemudian selesai diperbaiki dan dapat beroperasi kembali pada tanggal 11 Mei 2016.

Selama filter skimer tidak beroperasi, terlihat ada kotoran yang melayang-layang mengumpul di permukaan air kanal hubung dan tidak ditemukan di bagian dalam air kanal hubung. Sebelum dioperasikan filter skimer, dilakukan pengambilan sampel di 5 titik area kanal untuk dianalisis kandungan radionuklidanya dan dibandingkan dengan kain filter skimer yang digunakan untuk menyaring kotoran permukaan tersebut.

Ruang lingkup kegiatan ini meliputi pengambilan sampel air permukaan dan dalam kanal hubung, pengambilan sampel kain filter skimer kanal hubung, analisis jenis dan konsentrasi radionuklida dalam sampel air permukaan dan dalam kanal hubung serta pada kain filter skimer kanal hubung. Kegiatan ini bertujuan untuk membandingkan radionuklida kontaminan yang terdapat di air dengan yang terdapat di kain filter skimer penyaringnya sehingga juga dapat diketahui pengaruh pengoperasian filter skimer terhadap kualitas air kanal hubung secara keseluruhan.

TEORI

Kanal hubung menghubungkan tiga instalasi yaitu Instalasi Radio Metalurgi (IRM), Instalasi Produksi Radioisotop (IPR) dan Reaktor Serba Guna GA. Siwabessy (RSG-G.A.S) dan juga berfungsi sebagai jalur pemindahan material teriradiasi. Kolam penyimpanan berukuran panjang x lebar x kedalaman: 14m x 5m x (-6,5 m), dan berisi air pendingin sedalam 6,3 m. Kapasitas kolam penyimpanan ini mampu menyimpan 1458 BBNB [1].

IPSB3 memiliki konstruksi kolam yang berisi air bebas mineral berfungsi untuk pendinginan, proteksi radiasi, dan penahanan radionuklida dari BBNB untuk menghindari lepasan radionuklida ke lingkungan. Kualitas air kolam dijaga dengan mengoperasikan sistem purifikasi/pemurnian air dengan resin penukar ion. Sistem pendingin air dari IPSB3 dirancang untuk membuang panas sehingga suhu air kolam selalu kurang dari 35°C. Ventilasi dan pendingin udara sistem (VAC *off gas*) dioperasikan untuk menjaga suhu konstan udara 20-25 °C dan kelembaban relatif 40-60%, ruang tekanan negatif dari 100 + 25 Pa, dengan pembaharuan udara 5 kali per jam [2].

Elemen bakar yang digunakan di RSG-GAS adalah elemen bakar tipe *Material Testing Reactor* (MTR) dengan pengkayaan U-235 sebesar 19,75 %. Ada dua jenis elemen bakar yang selama ini digunakan di RSG-GAS yaitu

bahan bakar oksida U_3O_8 -Al dan bahan bakar silisida U_3Si_2 - AL. Elemen bakar jika diiradiasi akan menghasilkan sejumlah radionuklida hasil fisi. Nuklida hasil fisi yang terbentuk disamping dapat tetap terjebak di dalam matrik elemen bakar juga dapat lepas keluar dari matrik elemen bakar. Di antara nuklida hasil fisi yang paling mudah lepas adalah golongan gas mulia [3].

Saat ini ada 245 bundel BBNB tersimpan di IPSB3. Kondisi batas untuk operasi normal kolam penyimpanan bahan bakar nuklir bekas berdasarkan pada Sistem Operasi dan Proses dalam dokumen Laporan Analisis Keselamatan (LAK) KH-IPSB3 adalah sebagai berikut [4]:

- Kapasitas Maksimal BBNB yang dapat didinginkan (kapasitas penuh) yaitu 1458 bundel;
- Tinggi permukaan air kolam pada kapasitas penuh minimal 3,6 dari permukaan BBNB;
- Temperatur kolam penyimpanan maksimal sebesar $35\text{ }^\circ\text{C}$;
- pH berkisar 5,5 – 7,5 ;
- Konduktivitas air lebih kecil daripada $15\ \mu\text{S/cm}$;
- Kontaminasi udara lebih kecil daripada $5,3.10^2\ \text{Bq/m}^3$.

Kontaminasi radionuklida terdiri dari tiga jenis kontaminan adalah: radionuklida dari produk fisi, radionuklida dari aktivasi produk korosi, dan radionuklida dari aktinida (uranium dan trans-uranium). Kontaminasi uranium dan trans-uranium (TRU) ke dalam air dapat terjadi ketika kelongsong bahan bakar rusak (pecah atau retak) sehingga kebocoran dan melepaskan ke dalam sistem pendingin air [5].

Radionuklida Cs-137 dan Sr-90 merupakan produk fisi yang penting untuk dipantau karena memiliki paruh yang panjang (masing-masing 30,17 tahun dan 28,8 tahun), sehingga radionuklida tersebut merupakan kontributor utama yang terkandung dalam BBNB. Cs-137 dengan pemancar gamma kuat sehingga sangat mudah untuk dianalisa menggunakan Spektrometri Gamma. Kelarutan Cs-137 dengan dalam air tinggi, sehingga Cs-137 dengan mudah ditransfer ke dalam siklus sistem pendingin air. Pada Tabel 1, radionuklida Sr-90 tidak terdeteksi karena radionuklida ini murni β -emiter sehingga tidak dapat dideteksi dengan menggunakan Spektrometer Gamma. Dalam suhu tinggi, Cs-137 dan Sr-90 adalah isotop stabil dan relatif mudah untuk meredakan dan dapat menembus kelongsong bahan bakar nuklir, sehingga kedua isotop dapat lepas ke dalam air

pendingin primer reaktor sebagai kontaminan dan bergerak sampai ke air pendingin sistem kanal dan kolam KH-IPSB3 [5].

METODOLOGI

Peralatan dan bahan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah perangkat filter skimer dan perangkat spektrometri gamma.

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu:

- Botol Sampel volume 500 mL
- Ember ukuran 20 liter
- Kain filter skimer sesuai disain skimer.
- Nitrogen cair untuk keperluan analisis.
- Gas Nitrogen untuk keperluan analisis.

Metode

1. Pengambilan Sampel Air Permukaan

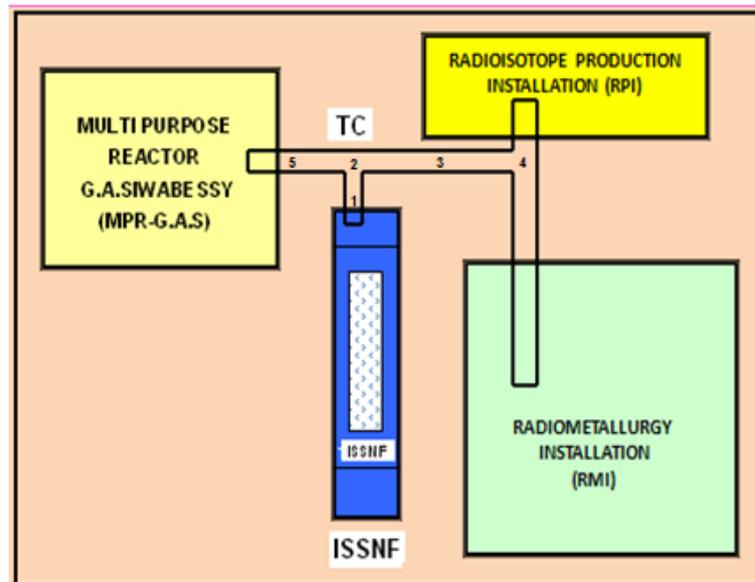
Sampel air permukaan kanal diambil di 5 titik yaitu Titik 1 pada area kanal dekat dengan kolam, Titik 2 pada area kanal di pertigaan antara arah kolam-RSG-IRM, Titik 4 pada area kanal diantara IRM dengan IPR, Titik 3 pada area pertengahan diantara Titik 2 dan 4, Titik 5 pada area kanal arah RSG.

2. Penyiapan Sampel Filter Skimer Kanal

Kain filter skimer yang disiapkan untuk dianalisis adalah kain filter skimer yang dipasang pada operasi alat skimer kanal pada saat pengambilan sampel air permukaan sampai dengan kain filter jenuh. Penyaringan dilakukan 6 jam pada setiap hari kerja.

3. Analisis Sampel Air dan Kain Filter

Sampel air kanal masing-masing sebanyak 500 mL dan kain filter dikirim ke laboratorium analisis Pusat Teknologi Limbah Radioaktif (PTLR) untuk dianalisis kandungan radionuklidanya. Analisis kadar radionuklida pada sampel air kanal maupun kain filter kanal dilakukan menggunakan spektrometer gamma tipe ORTEC dengan detektor Hp-Ge dan software MCA (Multy Channel Analyzer) untuk mendapatkan hasil analisis secara kuantitatif. Sistem dilengkapi dengan program gamma vision untuk mendapatkan hasil analisis secara kualitatif dan kuantitatif. Pencacahan radionuklida dilakukan selama 1 jam. Kurva efisiensi yang dipakai yaitu pada energi 200 sampai dengan 1400 keV menggunakan sumber standar Eu-152 cair. Alat spektrometer gamma yang digunakan untuk analisis ini mempunyai batas limit deteksi $1 \times 10^{-8}\ \mu\text{Ci/mL}$.



Gambar 1. Titik Sampling Air Permukaan Sepanjang Kanal Hubung

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengambilan sampel air permukaan kanal dilakukan pada saat sebelum dilakukan penyaringan air kanal menggunakan filter skimer di 5 (lima) titik pada area kanal pada tanggal 10 Mei 2016. Sedangkan kain filter penyaring air kanal dipasang pada alat penyaring air permukaan (skimer) yang dioperasikan mulai tanggal 11 Mei 2016 sampai dengan 31 Mei 2016. Pengoperasian skimer penyaring air permukaan kanal ini dilakukan selama 6 jam setiap hari kerja, sehingga total jam operasi

skimer adalah 90 jam. Skimer kanal dioperasikan secara terapan dan dapat dipindahkan di sepanjang Kanal Hubung. Kotoran permukaan air disedot dengan pompa air dan dilewatkan pada sebuah kantong filter terbuat dari kain. Pengambilan kain filter penyaring dilakukan pada saat kondisi sudah jenuh yang ditandai dengan permukaan kain filter yang sudah penuh dengan kotoran dan tidak dapat melewatkan air kanal yang disaring. Alat skimer dan kegiatan penggantian kain filter skimer di kanal hubung ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Alat Skimer Penyaring Air Permukaan Kanal Hubung

Analisis kadar radionuklida pada sampel air kanal maupun kain filter kanal dilakukan menggunakan spektrometer gamma dengan detektor Hp-Ge dan software MCA (*Multy Channel Analyzer*). Pencacahan dilakukan selama 1 jam. Kalibrasi energi pada MCA dilakukan untuk mengubah cacahan sebagai fungsi channel menjadi cacahan sebagai fungsi energi. Dengan kalibrasi energi dapat diidentifikasi jenis nuklida berdasarkan energi

gamma karakteristik yang dimiliki masing-masing radionuklida. Untuk melakukan kalibrasi energi digunakan sumber standar tunggal, antara lain Ba-137, Co-60, Cs-137. Kemudian dilakukan kalibrasi efisiensi untuk mengetahui efisiensi cacahan detektor dari energi gamma yang dipancarkan masing-masing radionuklida. Nilai efisiensi cacahan detektor yang diperoleh untuk masing-masing energi gamma selanjutnya dapat digunakan untuk menghitung konsentrasi

nuklida di dalam cuplikan. Untuk dapat melakukan kalibrasi efisiensi dibutuhkan sumber standar dengan kondisi pencacahan yang sama, yaitu wujud, geometri, energi gamma yang dipancarkan, dan waktu pencacahan yang sama dengan pencacahan cuplikan. Kalibrasi efisiensi yang dilakukan menggunakan material standar cair Eu-152 cair yang merupakan nuklida pemancar gamma multi energi. Material standar digunakan untuk membuat grafik efisiensi

sebagai fungsi energi. Nilai efisiensi ini dapat digunakan untuk menghitung konsentrasi masing-masing nuklida yang teridentifikasi. Hasil analisis radionuklida yang terkandung dalam air permukaan kanal fasilitas KH-IPSB3 ditunjukkan pada **Tabel 1.**, sedangkan hasil analisis radionuklida yang terkandung dalam kain filter penyaring air permukaan kanal ditunjukkan pada **Tabel 2.**

Tabel 1. Hasil Analisis Radionuklida Air Permukaan Kanal Hubung

No.	No. Sampel	Radionuklida	Aktivitas ($\mu\text{Ci/mL}$)	Waktu paro	Keterangan
1.	1	I-133	$2,7 \times 10^{-4}$	20 jam	Hasil belah
2.	2	ttd	-	-	-
3.	3	I-133	$5,0 \times 10^{-5}$	20 jam	Hasil belah
4.	4	I-132	$1,5 \times 10^{-5}$	137 menit	Hasil belah
5.	5	ttd	-	-	-

Ttd = tidak terdeteksi/di bawah batas deteksi alat
 Batas deteksi alat = $1 \times 10^{-8} \mu\text{Ci/mL}$

Tabel 2. Hasil Analisis Radionuklida Kain Filter Kanal

No.	Radionuklida	Aktivitas (μCi)	Waktu paro	Keterangan
1.	Cs-137	$0,0144 = 1,44 \times 10^{-2}$	30,18 tahun	Hasil belah
2.	Co-60	$0,0020 = 2,00 \times 10^{-3}$	5,3 tahun	Hasil aktivasi produk korosi

Tabel 3. Hasil Analisis Radionuklida Pada Sampel Air Kanal Hubung

No Sampel	Kode Sampel	Radionuklida	Aktivitas ($\mu\text{Ci/ml}$)	Waktu paro	Keterangan
1.	Kanal-261215	I-133	$5,86 \times 10^{-5}$	20 jam	Hasil fisi

Dalam **Tabel 1** menunjukkan adanya kontaminasi radionuklida pada air permukaan kanal hubung yang ditimbulkan dari pelepasan radionuklida hasil belah yaitu I-133 dan I-132. Setelah selama 15 hari operasi pemurnian air permukaan kanal menggunakan filter skimer dan kain filter dianalisis, seperti ditunjukkan **Tabel 2**, ternyata radionuklida I-133 dan I-132 tidak terdeteksi. Hal ini dimungkinkan karena radionuklida I-133 dan I-132 mempunyai waktu paro cukup pendek yaitu berturut-turut 20 jam dan 137 menit, sehingga radioaktivitas I-133 dan I-132 sudah meluruh dan memiliki aktivitas jenis di bawah limit deteksi alat. Pada kain filter skimer yang digunakan untuk menyaring air permukaan kanal hubung, hasil analisis radionuklidanya seperti ditunjukkan pada **Tabel 2**, terdeteksi radionuklida Cs-137 yang

merupakan radionuklida hasil belah dan Co-60 yang merupakan radionuklida hasil aktivasi produk korosi. Kedua radionuklida ini tidak terdeteksi pada air permukaan kanal hubung dimungkinkan karena konsentrasinya yang sangat rendah dengan aktivitas di bawah batas deteksi alat. Cs-137 dan Co-60 ini kemudian terakumulasi selama operasi filter skimer yaitu selama 15 hari kerja (90 jam operasi) dan sangat lambat meluruh karena memiliki waktu paro panjang yaitu 30,18 tahun dan 5,3 tahun.

Pada **Tabel 1**, radionuklida hasil belah I-133 terdeteksi pada Titik 1 dan 3, dan radionuklida I-132 terdeteksi pada Titik 4. Konsentrasi tertinggi radionuklida di permukaan air kanal pada Titik 1 yaitu mencapai $2,7 \times 10^{-4} \mu\text{Ci/mL}$ disebabkan oleh tidak beroperasinya

skimer penyaring permukaan air di kanal sejak bulan 18 Nopember 2015 sampai dengan 10 Mei 2016 karena ada kerusakan pompa.

Tabel 3 menunjukkan hasil analisis air kanal pada titik sampling di bagian dalam yang merupakan input ke sistem purifikasi. Dari Tabel tersebut dapat diketahui adanya kontaminasi radionuklida hasil belah yaitu I-133. Radionuklida Cs-137 dan Co-60 yang terdeteksi pada kain filter, tidak terdeteksi di air bagian dalam kanal hubung meskipun mempunyai waktu paro panjang dimungkinkan karena Cs-137 dan Co-60 cenderung menempel pada materi lain di permukaan air seperti kotoran dan debris kemudian melayang di permukaan air.

KESIMPULAN

Kegiatan evaluasi ini dilakukan dengan membandingkan tingkat kontaminasi radionuklida di air permukaan dan air kanal hubung pada saat operasi filter skimer berhenti selama periode 18 Nopember 2015 sampai dengan 10 Mei 2016 karena adanya kerusakan pada alat skimer, dibandingkan dengan kontaminasi radionuklida di kain filter skimer yang digunakan untuk pemurnian air permukaan kanal hubung. Hasil analisis radionuklida dalam air permukaan menunjukkan adanya kontaminasi radionuklida I-133 di 2 titik, dan I-132 di 1 titik, dengan konsentrasi tertinggi I-133 sebanyak $2,7 \times 10^{-4} \mu\text{Ci/ml}$. Hasil analisis radionuklida dalam air kanal hubung di bagian dalam juga menunjukkan radionuklida I-133 dengan konsentrasi sebanyak $5,86 \times 10^{-5} \mu\text{Ci/ml}$. Sedangkan hasil analisis kain filter yang digunakan untuk pemurnian dengan penyaringan air permukaan dideteksi adanya radionuklida Cs-137 dan Co-60 saja dengan aktivitas masing-masing $1,44 \times 10^{-2}$ dan $2,00 \times 10^{-3} \mu\text{Ci}$. Hal ini kemungkinan karena radionuklida Cs-137 dan Co-60 yang awalnya di bawah batas deteksi alat analisis, terakumulasi dalam kain filter skimer karena memiliki kecenderungan menempel pada kotoran/debris yang melayang di permukaan air kanal hubung. Sedangkan radionuklida I-133 dan I-132 yang terdeteksi di permukaan air maupun

bagian dalam air kanal hubung tidak terdeteksi di kain filter dimungkinkan karena aktivitasnya yang sudah meluruh karena mempunyai waktu paro pendek berturut-turut yaitu 20 jam dan 137 menit. Dari evaluasi ini juga dapat disimpulkan bahwa pengoperasian filter skimer untuk pemurnian air permukaan di kanal hubung sangat besar pengaruhnya dalam memurnikan air kanal hubung secara keseluruhan karena radionuklida kontaminan berumur panjang yaitu Cs-137 dan Co-60 yang merupakan parameter penting kualitas air kanal dapat terakumulasi di kain filter skimer.

DAFTAR PUSTAKA

1. Dyah S Rahayu, *Report of Repatriation for Spent Nuclear Fuel arising from MPR-GAS, BATAN, Serpong, Tangerang Selatan Banten, Indonesia*. 2010.
2. Zainus Salimin, "Heat Transfer Analysis on the Storage of Spent Fuel of Indonesia Multi-Purpose Reactor-30 MW", *Proceeding of 6th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics Operations and Safety, Nara, Japan*, pp. 155-164. 2004
3. Sudyono, "Pengoperasian Kanal Hubung-Instalasi Penyimpanan Sementara Bahan Bakar Bekas (KH-IPSB3)", *Diktat Pelatihan Operator dan Supervisor KH-IPSB3*, 2012.
4. Laporan Analisis Keselamatan Kanal Hubung Instalasi Penyimpanan Sementara Bahan Bakar Bekas (LAK KH-IPSB3), rev 7, PTLR – BATAN. 2009.
5. Gunandjar, dkk. "The Operation Safety Aspect On Contamination Of Radionuclides In The Interim Storage Of Spent Nuclear Fuel Installation", *Proceedings of the 3rd Applied Science for Technology Application, ASTECHNOVA 2014 International Energy Conference* Yogyakarta, Indonesia, 13-14 August 2014.

**DIFUSI RADIOCESIUM OLEH TANAH URUGAN
SEBAGAI BAHAN PENUTUP FASILITAS DISPOSAL DEMO
DI KAWASAN NUKLIR SERPONG :
KARAKTERISASI *DRY DENSITY* TANAH PERMUKAAN
DI LOKASI FASILITAS DISPOSAL DEMO**

Nurul Efri Ekaningrum, Budi Setiawan

*Pusat Teknologi Limbah Radioaktif-Badan Tenaga Nuklir Nasional
Kawasan Puspipstek Serpong Gedung 50, Tangerang Selatan, Banten 15310
Email: efrisoul@batan.go.id*

ABSTRAK

DIFUSI RADIOCESIUM OLEH TANAH URUGAN SEBAGAI BAHAN PENUTUP FASILITAS DISPOSAL DEMO DI KAWASAN NUKLIR SERPONG : KARAKTERISASI *DRY DENSITY* TANAH PERMUKAAN DI LOKASI FASILITAS DISPOSAL DEMO. Penyiapan Fasilitas Disposal Demo di Kawasan Nuklir Serpong telah dilakukan oleh Pusat Teknologi Limbah Radioaktif sejak Tahun 2010 untuk mendukung program pembangunan dan pengoperasian Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) di Indonesia yang akan datang. Oleh karena itu, dibutuhkan pengkajian keselamatan untuk memenuhi persyaratan pembangunan Fasilitas Disposal Demo. Salah satu bagian dalam pengkajian keselamatan adalah diperlukannya input data besaran kimia yaitu difusi radiocesium oleh tanah urugan sebagai bahan penutup fasilitas disposal demo yang pada tahun pertama ini akan diukur *dry density* tanah urugan terlebih dahulu sebagai batasan penelitian. Maka penelitian difusi radiocesium oleh tanah urugan perlu dilakukan untuk mendapatkan informasi karakter spesifiknya sebagai bahan penutup fasilitas disposal demo. Dalam penelitian difusi ini didapatkan data besaran *dry density* tanah urugan atau tanah permukaan di lokasi fasilitas disposal demo sebesar $1,41 \text{ g/cm}^3$. Berdasarkan penelitian Hillel 1980b menunjukkan bahwa karakteristik bahan penutup fasilitas disposal demo termasuk tipe *Sandy loam* atau lempung berpasir.

Kata Kunci : *dry density*, difusi, urugan.

ABSTRACT

RADIOCESIUM DIFFUSION BY LAND MATERIALS AS FINAL DEMO DISPOSAL FACILITY COVER IN THE SERPONG NUCLEAR AREA : CHARACTERIZATION OF *DRY DENSITY* SOIL SURFACE ON DEMO DISPOSAL FACILITY LOCATION. Preparation Disposal Facility Demo in Serpong Nuclear Zone has been done by the Radioactive Waste Technology Center since 2010 to support the construction and operation of the Nuclear Power Plant (NPP) in Indonesia in the future. Therefore, the safety assessments needed to meet development requirements of Demo Disposal Facility. One part of the safety assessment is the need for massive chemical data input, namely radiocesium diffusion by soil as cover material on demo disposal facility that in the first year will be measured *dry density* of soil cover beforehand as a limitation of the study. Then the radiocesium diffusion research by soil needs to be done to obtain information specific character as cover material for demo disposal facility. In this diffusion research data obtained amount of *dry density* of soil surface on disposal facility at the site demo is about 1.41 g/cm^3 . Based on research Hillel 1980b showed that the characteristics of the cover material disposal facilities demo includes the type *sandy loam*.

Keywords : *dry density*, diffusion, cover.

PENDAHULUAN

Penyiapan Fasilitas Disposal Demo di Kawasan Nuklir Serpong telah dilakukan oleh Pusat Teknologi Limbah Radioaktif sejak Tahun 2010 untuk melengkapi fasilitas pengelolaan limbah radioaktif di Kawasan Nuklir Serpong. Oleh karena itu, dibutuhkan pengkajian keselamatan untuk memenuhi persyaratan pembangunan Fasilitas Disposal Demo.

Salah satu bagian dalam pengkajian keselamatan adalah diperlukannya input data besaran kimia fisika seperti difusi radiocesium oleh tanah urugan di SP 4 sebagai bahan penutup

fasilitas disposal demo yang pada tahun pertama ini akan diukur *dry density* tanah urugan terlebih dahulu sebagai batasan penelitian. Maka penelitian difusi radiocesium oleh tanah urugan perlu dilakukan untuk mendapatkan informasi karakter spesifiknya sebagai bahan penutup fasilitas disposal demo pada penelitian mendatang.

Pengukuran *dry density* tanah di lokasi SP 4 bertujuan untuk mengetahui *range* densitas yang akan digunakan dalam penelitian difusi selanjutnya. Setelah mendapatkan besaran *dry density* tanah urugan di lokasi SP 4, akan dievaluasi dan dikarakterisasi jenis tanah urugan

tersebut menggunakan Tabel *Dry Density* beberapa jenis tanah. Maka akan diketahui termasuk jenis tanah apakah tanah yang akan digunakan sebagai bahan urugan fasilitas Disposal Demo di SP4 tersebut. Setelah mendapatkan besaran *dry density* akan digunakan untuk mengolah data difusi bahan sistem penutup fasilitas disposal demo sebagai data spesifik input *software* PRESTO.

TEORI

Densitas, sebagaimana diterapkan pada segala jenis bahan homogen atau monofase M (massa) dan V (volume), dinyatakan sebagai rasio M:V. Dalam kondisi tertentu, definisi ini mengarah pada nilai-nilai unik material tertentu. Untuk bahan heterogen dan multifase, namun medianya berpori, penerapan definisi densitas dapat menyebabkan hasil yang berbeda [1].

Tanah adalah bahan multifase atau heterogen dengan sistem berpori yang khas. Dalam bentuk umum, berisi tiga fase alami: (1)

fase padat atau matriks tanah (yang dibentuk oleh partikel mineral dan bahan organik padat); (2) fase cair, yang sering diwakili oleh air dan yang bisa lebih tepat disebut larutan tanah; dan (3) fase gas, yang berisi udara dan gas-gas lainnya. Dalam tiga fase tanah ini, densitas tanah rata-rata dapat digunakan untuk menentukan kepadatan berikut: (1) kepadatan padatan atau kepadatan partikel tanah, (s); (2) massal atau kepadatan kering, (b); dan (3) jumlah atau kepadatan basah, (t) [1].

Dry density merupakan indikator pemadatan tanah dan kondisi tanah. Ini mempengaruhi infiltrasi, kedalaman / pembatasan, kapasitas air yang tersedia, porositas tanah, ketersediaan unsur hara, dan aktivitas mikroorganisme tanah, yang mempengaruhi proses tanah dan produktivitas. [2].

Dry density tanah (ρ_b), adalah rasio massa fase padat dari tanah (yaitu, tanah kering) dengan volume total (volume dari padat dan berpori), didefinisikan sebagai berikut :

$$\rho_b = \frac{M_s}{V_t} = \frac{M_s}{V_s + V_l + V_g}$$

Bulk (dry) density, ρ_b , berkaitan dengan kepadatan partikel tanah, (ρ_s), dengan total porositas tanah (p_t), dengan persamaan berikut:

$$\rho_b = (1 - p_t)\rho_s$$

Dimana $1 - p_t$ adalah rasio volume padatan terhadap volume total ($V_s + V_l + V_g$) [1].

Dry density sebagian besar tanah bervariasi dalam kisaran 1,1-1,6 g/cm³. Di tanah berpasir, kepadatan kering dapat setinggi 1,6 g/cm³; di tanah liat dan tanah liat agregat, bernilai 1,1 g/cm³ (Hillel 1980b). Karena tingkat agregasinya yang tinggi (yaitu, nilai porositas totalnya kecil),

maka beton secara umum memiliki kepadatan kering lebih tinggi dari tanah. Nilai-nilai khas *dry density* dari berbagai jenis tanah dan beton ditunjukkan pada Tabel 1. *Dry density* tergantung pada struktur matriks tanah (atau derajat pemadatan atau kelonggaran) dan karakteristik pembengkakan atau penyusutan tanah matriks ini [1].

Tabel 1. Nilai *Dry Density* Berbagai Jenis Tanah dan Beton .

Tipe Tanah	<i>Dry Density</i> , g/cm ³
Sand (Pasir)	1,52
Sandy loam (Lempung berpasir)	1,44
Loam (Lempung)	1,36
Silt loam (Lanau lempung)	1,28
Clay Loam (Lempung liat)	1,28
Clay (Lempung)	1,20
Concrete (Beton)	2,40

Sumber : Hillel 1980b [3] , Linsley et al. (1982) [4]; Poffijn (1988) [5].

METODOLOGI

Metode pengukuran dry density ini sudah banyak digunakan dalam penelitian di perguruan tinggi dan lembaga penelitian yang berhubungan dengan ilmu teknik atau ilmu geologi. Maka cara-cara bagaimana data dikumpulkan, dan cara menganalisis datanya dengan jelas dapat diulang oleh peneliti lainnya dengan mengacu pada publikasi-publikasi sebelumnya. Berikut adalah langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian ini :

- Penyiapan sampel tanah.
Pengambilan sampel tanah dilakukan menggunakan *Core Cutter* , semacam silinder berlubang yang ditancapkan ke tanah untuk mengambil sampel sehingga berbentuk seperti lontong tanah. Pengambilan sampel tanah dilakukan sebanyak tiga kali pengulangan.

- Penimbangan sampel tanah basah sebanyak 3 kali pengulangan.
- Penimbangan sampel tanah kering (dioven selama 24 jam) sebanyak 3 kali pengulangan.
- Tempatkan sampel tanah yang telah dikeluarkan dari oven ke desikator hingga mencapai suhu ruangan.
- Pengukuran *dry density* tanah dengan mengikuti Metode Perhitungan *Core Cutter* yang telah banyak digunakan di Perguruan Tinggi akan dilampirkan Tabel Perhitungannya dibawah ini.
- Analisis dan evaluasi.

Penelitian ini menggunakan bahan dan peralatan sebagai berikut : timbangan, oven, alat-alat gelas, cawan porselen, 1 set alat sampling tanah, dan desikator. Dari penelitian yang telah dilakukan berikut Tabel hasil perhitungannya.

Tabel 2. Laporan Pengukuran *Water Content*

Job : Pengukuran <i>Water Content</i> Tanah SP4 dengan Metode <i>Core Cutter</i>		Tested by : Nurul Efri Ekaningrum, S.ST		
Location : SP4 Calon Tapak Demo Disposal		Date : 30 Oktober 2015		
Sampel Detail :				
Location SP4		Depth below ± 130 mm		
Type : Tanah Permukaan		Description		
No	Determination no.	1	2	3
	Containers no.	I	II	III
1	Weight of containers (W_1), g	56,256	55,932	56,197
2	Weight of containers + Wet Soil (W_2), g	105,65	106,66	105,99
3	Weight of containers + Dry Soil (W_3), g	103,37	104,45	103,42
4	Weight of Moisture ($W_2 - W_3$), g	2,28	2,21	2,57
5	Weight of Dry Soil ($W_3 - W_1$), g	47,114	48,52	47,22
6	Water Content (W) $W = \frac{W_2 - W_3}{W_3 - W_1} \times 100 \%$	4,84	4,55	5,44
7	Average Water Content (W) 4,94 %			

Tabel 3. Laporan Pengukuran Dry Density

Job : Pengukuran <i>Dry Density</i> Tanah SP4 dengan Metode <i>Core Cutter</i>		Tested by : Nurul Efri Ekaningrum, S.ST		
Location : SP4 Calon Tapak Demo Disposal		Date : 30 Oktober 2015		
Sampel Detail :				
Location SP4		Depth below ± 130 mm		
Type : Tanah Permukaan		Description		
No	Observation and Calculation	Determination		
		1	2	3
1	Volume of core cutter (V Cylinder), cm ³ $= \frac{\pi}{4} \times 8,592^2 \times 11,652$	675,86 cm ³	675,86 cm ³	675,86 cm ³
2	Weight of core cutter (Wc), g	86,4	86,4	86,4
3	Weight of core cutter + wet soil (Ws), g	1087,3	1107,1	1071

4	Weight of wet soil ($W_s - W_c$), g	1000,9	1020,7	984,6
5	Bulk Density $Y_b = \left(\frac{W_s - W_c}{V_c} \right)$, g/cm ³	1,48	1,51	1,46
6	Water Content (W), %	4,84	4,55	5,44
7	Dry Density $Y_d = \left(\frac{Y_b}{1+W} \right)$, g/cm ³	= 1,48/1,0484 = 1,41	= 1,51/1,0455 = 1,44	= 1,46/1,0544 = 1,38
8	Average dry density = 1,41 g/cm ³			

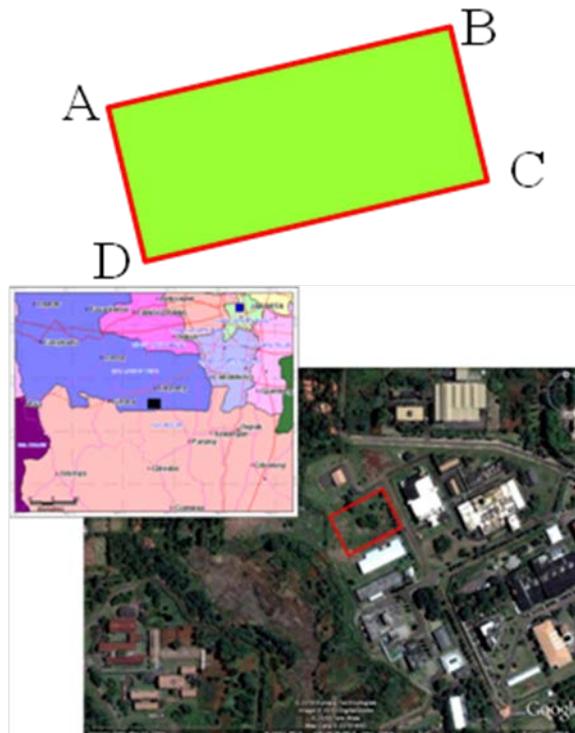
HASIL DAN PEMBAHASAN

Dry density merupakan indikator pemadatan tanah dan kondisi tanah. Ini mempengaruhi infiltrasi, kedalaman /

pembatasan, kapasitas air yang tersedia, porositas tanah, ketersediaan unsur hara, dan aktivitas mikroorganisme tanah, yang mempengaruhi proses tanah dan produktivitas [2].



Gambar 1. Lokasi titik pengambilan sampel tanah sekitar DH-3 SP 4 Fasilitas Demo Disposol.



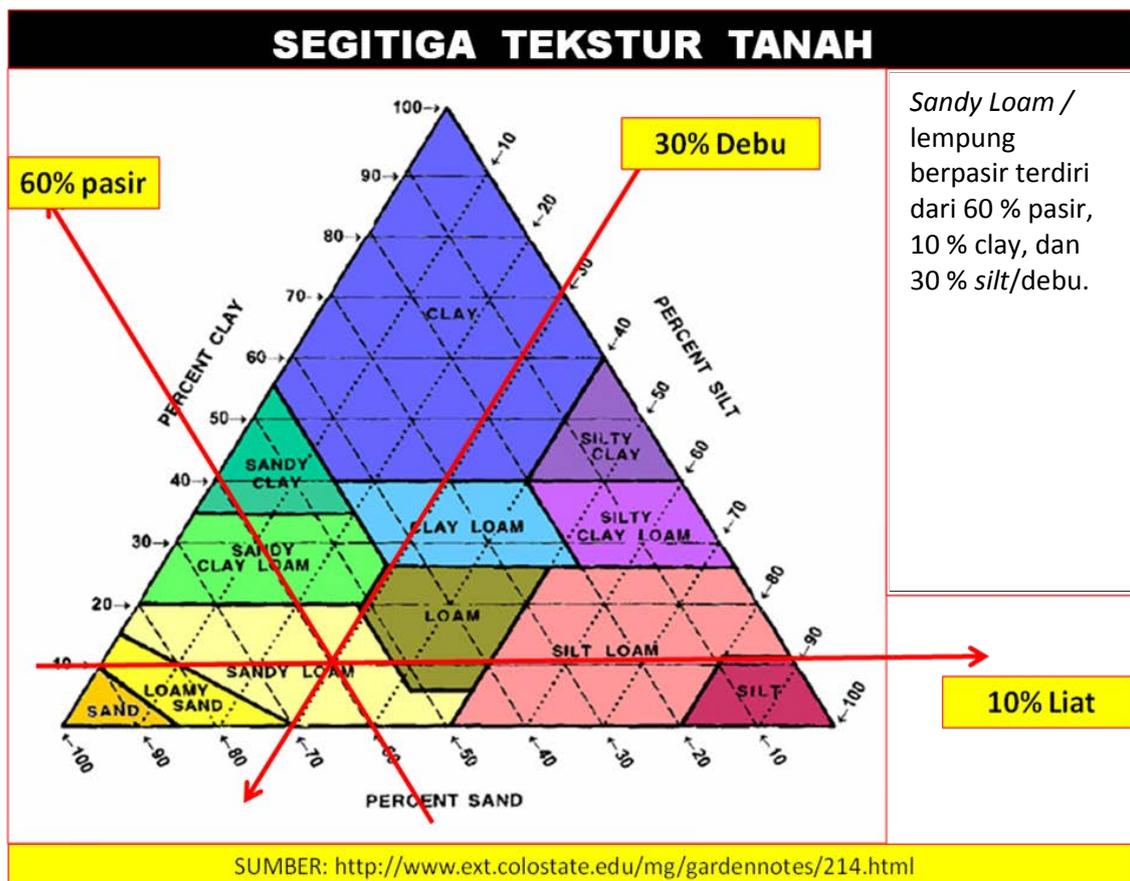
Gambar 2. Lokasi Fasilitas Demo Disposol.

Lokasi penelitian *dry density* berada di SP4 Calon Tapak Demo Disposasi, Kawasan Nuklir Serpong, PUSPIPTEK, Tangerang Selatan, Banten. Tanah yang diteliti nantinya akan digunakan sebagai bahan penutup Fasilitas Demo Disposasi. Pengambilan sampel tanah pada kedalaman tidak lebih dari 25 cm. Fasilitas Demo Disposasi merupakan wilayah berbentuk persegi panjang ukuran 85 m x 50 m; Koordinat lokasi : (A. 6°20'55,42" LS/106°39'40,05" BT), (B. 6°20'54,31" LS/106°39'42,62" BT), (C. 6°20'56,15" LS/106°35'43,61" BT), (D. 6°20'57,49" LS/106°39'40,06" BT).

Menurut Hardjowigeno (1992) tekstur tanah menunjukkan kasar halusnya tanah. Tekstur tanah merupakan perbandingan antara butir-butir pasir, debu, dan liat. Tekstur tanah dikelompokkan menjadi 12 kelas tekstur. Kedua belas tekstur dibedakan berdasarkan prosentase kandungan pasir, debu, dan liat. Tekstur tanah di lapangan dapat dibedakan dengan cara manual yaitu dengan memijit tanah basah di antara jari jempol dengan jari telunjuk, sambil dirasakan halus kasarnya yang meliputi rasa keberadaan butir-butir pasir, debu, dan liat [6]. Karakterisasi tanah DH-3 dinilai dengan cara kualitatif biasa

digunakan *surveyor* tanah dalam menetapkan kelas tekstur tanah di lapangan. Tekstur tanah lokasi DH-3 memiliki rasa kasar agak jelas, agak melekat, dan dapat dibuat bola tetapi mudah hancur, maka tanah tersebut tergolong bertekstur Lempung Berpasir (*Sandy Loam*) [6]. Tanah ini mengalir air dengan cepat, tetapi masih mampu menyimpan sejumlah air tanah. Partikel-partikel tanah lempung berpasir nyaris tidak saling menempel. Jenis tanah ini mempunyai masalah kesuburan dan harus diperbaiki dengan menambahkan sejumlah bahan organik.

Mengingat terdapat beberapa sistem pengelompokan fraksi ukuran butir tanah, maka penyajian hasil analisis ini digunakan sistem USDA [7]. Tanah dengan berbagai perbandingan pasir, debu, dan liat dikelompokkan atas berbagai kelas tekstur seperti digambarkan pada Segitiga Tekstur Tanah (Gambar 3). Dari Gambar 3, dapat diketahui tipe tanah urugan atau bahan penutup fasilitas disposasi demo termasuk tipe *Sandy loam* atau lempung berpasir dengan komposisi 60 % pasir dan 10 % liat, dan 30 % debu / silt [8].



Gambar 3. Bagan Triangle Tekstural, Metode U.S. Department of Agriculture dalam Penamaan Tanah (Sumber : Brady 1984[7]) [9]

Setelah dilakukan analisis kualitatif, kita menuju analisis kuantitatif. Dari perhitungan kuantitatif yang dilakukan dengan Metode *Core Cutter* didapatkan rata-rata *dry density* tanah urugan sebesar $1,41 \text{ g/cm}^3$ (Tabel 2 dan

Tabel 3). Dari Tabel 1, Penelitian Hillel 1980b, maka tipe tanah urugan atau bahan penutup fasilitas disposal demo di SP4 termasuk tipe *Sandy loam* atau lempung berpasir.

Tabel 3. Nilai *Dry Density* Berbagai Jenis Tanah dan Beton .

Tipe Tanah	<i>Dry Density</i> , g/cm^3
Sand (Pasir)	1,52
Sandy loam (Lempung berpasir)	1,44
Loam (Lempung)	1,36
Silt loam (Lanau lempung)	1,28
Clay Loam (Lempung liat)	1,28
Clay (Lempung)	1,20
Concrete (Beton)	2,40
Sumber : Hillel 1980b, Linsley et al. (1982); Poffijn (1988).	

KESIMPULAN

Dari hasil analisis kualitatif didapatkan bahwa tipe tanah di Lokasi SP4 merupakan jenis Tanah Lempung Berpasir (Sandy Loam) karena rasa kasar agak jelas, agak melekat, dan dapat dibuat bola tetapi mudah hancur .

Dari hasil analisis kuantitatif didapatkan rata-rata *Dry Density* tanah urugan sebesar $1,41 \text{ g/cm}^3$. Dari Tabel 1, Penelitian Hillel 1980b, maka tipe tanah urugan atau bahan penutup Fasilitas Disposal Demo di SP4 termasuk tipe *Sandy loam* atau lempung berpasir.

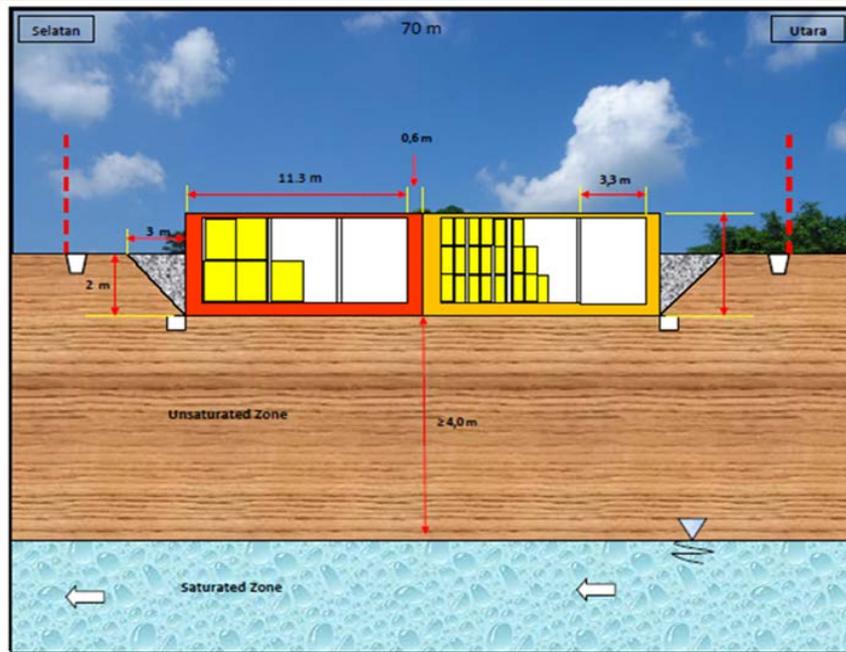
UCAPAN TERIMA KASIH

Kepada DR. Budi Setiawan dan Yuli Purwanto, A.Md, saya ucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya atas bimbingan dan kerja samanya.

DAFTAR PUSTAKA

1. C. Yu, C. Loureiro, J. J. Cheng, L. G. Jones, Y. . Wang, Y. P. Chia, and E. Faillace, "Data collection handbook to support modeling impacts of radioactive material in soil," no. April, p. 158, 1993.
2. C. M. Lewandowski, N. Co-investigator, and C. M. Lewandowski, "Soil Bulk Density/Moisture/Aeration," *The effects of brief mindfulness intervention on acute pain experience: An examination of individual difference*, 2015. [Online]. Available: <http://web.ead.anl.gov/resrad/datacoll/soildevns.htm>.
3. Daniel Hillel, *Fundamentals of Soil Physics*.
4. M. A. K. [and] J. L. H. P. Ray K. Linsley, *Hydrology for engineers*.
5. V. H. and W. P. Poffijn A., Charlet J.M., Cottens E., Hallez S., "No TitleBiotechnology for Waste Management and Site Restoration: Technological."
6. H. 1992, *Ilmu Tanah*, Ketiga. Jakarta: PT. Mediyatama Sarana Perkasa, 1992.
7. W. W. Brady, *Technologies to Benefit Agriculture and Wildlife*. Diane Publishing.
8. Iradatullah Rahim, *Dasar-dasar Ilmu Tanah*, 2000.
9. "Physical Properties Of Soils." [Online]. Available: <http://docslide.us/documents/physical-properties-of-soils-ges175-science-of-soils.html>. [Accessed: 21-Jan-2016].

Konsep *Disposal* Yang Direkomendasikan



Gambar 4. Penampang Melintang Penempatan Disposal Demo pada Tapak SP-4 Kawasan Nuklir Serpong



UJI INTEGRITAS KELONGSONG BAHAN BAKAR NUKLIR BEKAS REAKTOR DENGAN METODE UJI CICIP

Dyah Sulistyani Rahayu, Darmawan Aji,
Pusat Teknologi Limbah Radioaktif-Badan Tenaga Nuklir Nasional
Kawasan Puspipstek Serpong Gedung 50, Tangerang Selatan, Banten 15310
Email: yayuk@batan.go.id

ABSTRAK

UJI INTEGRITAS KELONGSONG BAHAN BAKAR NUKLIR BEKAS REAKTOR DENGAN METODE UJI CICIP. Telah dilakukan uji integritas terhadap bahan bakar nuklir bekas (BBNB) yang bertujuan untuk mengetahui kebocoran kelongsong bahan bakar nuklir bekas dengan nomer RI-309, RI-358, RI-389. Pemilihan nomer BBNB berdasarkan tahun dimasukkan dan dikeluarkannya dari teras reaktor serta burn up yang berbeda. Uji cicip merupakan salah satu teknik uji tak merusak untuk deteksi integritas kelongsong elemen bakar dengan mendeteksi dan mengidentifikasi keberadaan radionuklida hasil fisi yaitu keberadaan Cs 137 di dalam air rendaman elemen bakar setelah diiradiasi sebagai indikator kebocoran. Hasil air rendaman BBNB dengan rendaman selama 4, 22,46 dan 142 jam dan pengukuran aktivitasnya menggunakan spektrometri gamma telah dilakukan. Hasil yang diperoleh adalah bahan bakar dengan nomer RI-309 pada masa perendaman 142 jam aktivitas jenis Co-60 = $2,0 \times 10^{-6}$ $\mu\text{Ci} / \text{ml}$; RI-375 pada masa perendaman 142 jam aktivitas jenis Co $^{60} = 5,40 \times 10^{-6}$ $\mu\text{Ci} / \text{ml}$ dan masa perendaman 142 jam, aktivitas jenis Co-60 = $5,40 \times 10^{-6}$ $\mu\text{Ci} / \text{ml}$; dan RI-389 pada masa perendaman selama 142 jam aktivitas jenis Co-60 = $3,0 \times 10^{-6}$ $\mu\text{Ci} / \text{ml}$. Dari hasil ini menunjukkan bahwa tidak terdeteksinya Cs137 yang merupakan produk fisi indikasi kebocoran dalam bahan bakar nuklir bekas yang dideteksi. Sedangkan adanya Co-60 mengindikasikan adanya produk aktivasi dari teras reaktor yang terikut pada pada material kelongsong, meskipun masih dalam ambang batas yang diijinkan.

Kata kunci: kebocoran bahan bakar nuklir bekas, produk fisi, uji cicip dingin, spektrometri sinar- γ

ABSTRACT

INTEGRITY TEST OF THE SPENT NUCLEAR FUEL USING SIPPING TEST METHOD. The integrity of the spent nuclear fuel have been tested to determine the leakage of spent nuclear fuel cladding with a batch number RI-309, RI-358, RI-389. Batch Number Selection is based loading and unloading from reactor core and burn up. Sipping test is one of the non-destructive testing techniques for detection the leakage of spent fuel cladding by detecting and identifying the presence of fission radionuclides, the existence of Cs 137 in the water after irradiated as an indicator of a leakage. The integrity test on 3 of spent fuel have been done with radionuclide identification and activity measurements using gamma spectrometry. The results of the immerse of spent fuel for 4, 22, 46 and 142 hours and concentrations measurements using gamma spectrometry. The result is a fuel with a batch number RI-309 in 142 hours immersion concentration of Co-60 = 2.0×10^{-6} $\mu\text{Ci} / \text{ml}$, RI-375 in 142 hours immersion concentration Co $^{60} = 5,40 \times 10^{-6}$ $\mu\text{Ci} / \text{ml}$ and 142 hour immersion concentration of Co-60 = 5.4×10^{-6} $\mu\text{Ci} / \text{ml}$; and RI-389 in 142 hours immersion concentration of Co-60 = $3,0 \times 10^{-6}$ $\mu\text{Ci} / \text{ml}$. From these results indicate that there are no leaks in the spent fuel is detected. The presence of Cs 137 in the water immersion for further analysis to know the source and cause of radionuclide released. While the presence of Co 60 indicates the result of activation product from reactore core in cladding material, although still within the allowable threshold.

Keywords: leakage of spent nuclear fuel, fission product, sipping test, γ -ray spectrometry

PENDAHULUAN

Kanal Hubung – Instalasi Penyimpanan Sementara Bahan Bakar Bekas (KH-IPSB3) merupakan instalasi nuklir non reaktor untuk penyimpanan sementara bahan bakar bekas yang mempunyai potensi bahaya yang cukup besar sehingga dalam pengoperasiannya harus diperhatikan keselamatan dan keamanannya [1]. Bahan bakar nuklir bekas adalah bahan bakar yang telah terkena iradiasi neutron, dikeluarkan dari

teras reaktor dan tidak dipakai lagi untuk operasi. Berbeda dengan bahan bakar nuklir segar, bahan bakar nuklir bekas telah mengandung produk fisi yang bersifat radioaktif. Dalam reaktor nuklir, bahan bakar menghasilkan neutron dan panas selama periode operasi. Radionuklida hasil fisi dapat keluar dari elemen bakar ke dalam air pendingin karena adanya kebocoran pada kelongsong elemen bakar yang digunakan saat ini berusia di atas 5 tahun dengan nilai fraksi bakar (*burnup*) yang tinggi yaitu mencapai lebih dari 50% [2].

Berdasarkan usia dan fraksi bakar maka perlu dilakukan pemeriksaan untuk mengetahui integritas kelongsong elemen bakar. Hasil uji integritas kelongsong elemen bakar disamping akan digunakan untuk melihat unjuk kerja elemen bakar juga sebagai antisipasi bahaya radiasi dari kemungkinan adanya lepasan gas hasil fisi ke air pendingin maupun udara [3].

Uji cicip (*sipping test*) merupakan salah satu teknik uji tak merusak untuk deteksi integritas kelongsong elemen bakar dengan mendeteksi dan mengidentifikasi keberadaan radionuklida hasil fisi di dalam air rendaman elemen bakar setelah diiradiasi sebagai indikator kebocoran. Pada penelitian ini dideteksi 3 BBNB dengan umur penyimpanan dan fraksi bakar yang berbeda. Uji cicip dingin merupakan uji cicip untuk kondisi elemen bakar yang telah lama diiradiasi dengan nuklida indikator kebocoran adalah Cs-137 [3]. Berbeda dengan uji cicip dingin, uji cicip panas dilakukan dalam kondisi elemen bakar diiradiasi di teras reaktor dan radionuklida hasil fisi yang digunakan sebagai indikator rusaknya integritas kelongsong adalah gas mulia. Radionuklida dari golongan gas mulia merupakan hasil fisi yang mudah keluar saat elemen bakar diiradiasi jika terjadi kerusakan pada kelongsong elemen bakar. Untuk pelaksanaan uji cicip dingin dibuat perangkat uji integritas elemen bakar nuklir bekas,

dengan mempertimbangkan aspek keselamatan, sehingga paparan radiasi yang diterima pekerja diupayakan sekecil mungkin.

TEORI

A. Karakteristik Bahan Bakar Nuklir Bekas (BBNB)

Reaktor GA Siwabessy merupakan salah satu reaktor penelitian yang mempunyai daya dan fluks neutron tinggi serta menggunakan bahan bakar uranium dengan pengayaan rendah dengan daya nominal 30 MW. Dalam pengoperasiannya reaktor ini memerlukan bahan bakar nuklir berupa 40 elemen bakar standar dan 8 elemen bakar kendali. Bahan bakar aktif adalah bahan bakar yang telah teriradiasi di dalam teras reaktor. Bahan bakar yang digunakan di RSG GAS adalah elemen bakar tipe *Material Testing Reactor* (MTR) dengan pengkayaan U-235 sebesar 19,75% , terdispersi dalam matriks Al bentuk plat. Spesifikasi bahan bakar nuklir bekas yang dipindahkan adalah elemen bakar bekas jenis U_3Si_2Al dan U_3O_8Al , uraniumnya berasal dari Amerika Serikat, burn up nya mencapai 49 - 59% dan telah mengalami pendinginan pendahuluan minimum selama 100 hari di kolam penyimpanan sementara RSG GAS.[6]

Spesifikasi elemen bakar ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1 menunjukkan spesifikasi elemen bakar dari RSG-GAS [4]

Dimensi (mm x mm x mm)	77.1 x 81 x 600
Jumlah plat per <i>Fuel Element</i> (FE)	21
Jumlah plat per <i>Control Element</i> (CE)	15
Bahan Kelongsong	AlMg ₂
Tebal kelongsong (mm)	0.38
Dimensi bahan bakar (mm x mm x mm)	0.54 x 62.75 x 600
bahan bakar	U ₂ Si ₃ Al
Pengkayaan U-235 (w/o)	19.75%
Densitas Uranium (g/cm ³)	2.96
Berat U-235 per FE (g)	250
Berat U-235 per CE (g)	178.6

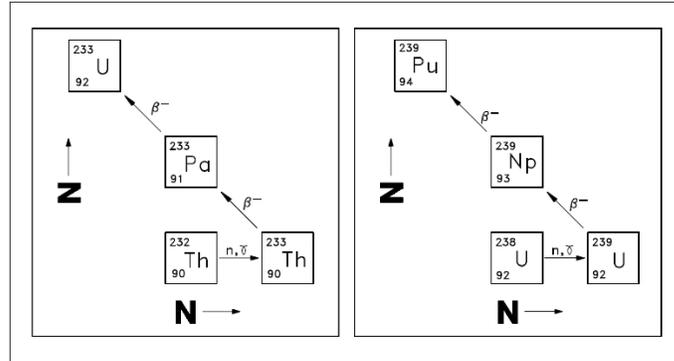
B. Reaksi Pembelahan Nuklir

Reaksi pembelahan nuklir adalah proses terjadinya pembelahan atom fisil dan pelepasan energi, nuklida hasil belah dan neutron. Neutron yang dihasilkan dapat melakukan reaksi pembelahan dengan atom fisil lain [1]. Dalam kaitannya dengan reaksi pembelahan nuklir, beberapa nuklida yang penting adalah [2] :

1. Nuklida fisil yaitu nuklida yang dapat melakukan reaksi pembelahan dalam seluruh rentang energi neutron, contoh ²³⁵U, ²³³U dan ²³⁹Pu.
2. Nuklida dapat belah (*fissionable*) yaitu nuklida yang memiliki kebolehdjian mengalami reaksi pembelahan dengan neutron. Nuklida fisil dapat dikategorikan

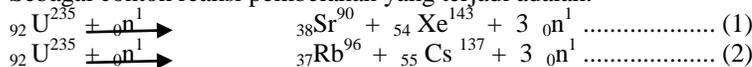
sebagai nuklida dapat belah. Demikian juga dengan nuklida yang mengalami reaksi pembelahan dengan neutron energi tinggi dapat dikategorikan sebagai nuklida dapat belah, misal ^{232}Th , ^{238}U dan ^{240}Pu .

3. Nuklida fertil yaitu nuklida yang dapat mengalami transmudasi untuk menjadi nuklida fisil seperti Th^{232} dan U^{238} yang ditunjukkan dalam Gambar 1.



Gambar 1. Konversi dari nuklida fertil ke nuklida fisil [2]

Sebagai contoh reaksi pembelahan yang terjadi adalah:



Radionuklida Sr^{90} dan Cs^{137} adalah produk fisi utama. Sebenarnya ada sekitar 200 produk fisi yang dihasilkan, tetapi pada Tabel 2 hanya menampilkan

16 produk fisi utama yang menunjukkan prosen yields > 1 % .

Tabel 2. Produk Fisi Utama dengan prosen yields>1% [1]

Isotope	Radiation	Half-life	Yield (%)
Strontium-91/yttrium-90	β	28 years	5,8%
Caesium-137	β, γ	30 years	6,2%
Promethium-147	β	2.6 years	2,7%
Cerium-144	β, γ	285 days	6,1%
Ruthenium-106/rhodium-106	β, γ	1.0 years	3,0 %
Zirconium-95	β, γ	65 days	6,4 %
Strontium-89	β	51 days	4,8 %
Ruthenium-103	β, γ	39.7 days	3,0 %
Niobium-95	β, γ	35 days	6,4 %
Cerium-141	β, γ	33 days	6,0 %
Barium-140/lanthanum-140	β, γ	12.8 days	5,0 %
Iodine-131	β, γ	8.05 days	2,9 %
Tritium	β	13 years	6,5 %
Xenon - 133		5.3 days	6,5 %
Tc 99		2.1×10^5 years	6,0 %
Nd 147		11.3 days	2,9 %

Pada operasi normal KHIPSB3, produk fisi yang berasal dari bahan bakar nuklir bekas hanya radionuklida seperti ^{173}Cs , ^{90}Sr , ^{131}I , ^{85}Kr dan ^{133}Xe yang dapat lepas ke air kolam KHIPSB3.

Di antara nuklida hasil fisi yang paling mudah lepas adalah golongan gas mulia. Pada iradiasi pendek diperlihatkan bahwa gas mulia hasil fisi yang lepas dengan aktivitas tinggi adalah Xe-138, Kr-87, Kr-88, Kr-85m dan Xe-135. Radionuklida hasil fisi dapat keluar dari elemen bakar ke dalam air pendingin karena adanya kebocoran pada kelongsong elemen bahan bakar nuklir bekas. Berdasarkan usia dan fraksi bakar maka perlu dilakukan pemeriksaan untuk mengetahui integritas kelongsong elemen bakar. Hasil uji integritas kelongsong elemen bakar disamping akan digunakan untuk melihat unjuk kerja elemen bakar juga sebagai antisipasi bahaya radiasi dari kemungkinan adanya lepasan gas hasil fisi ke air pendingin maupun udara.

METODE

A. Bahan dan peralatan

1. Detektor monitor radiasi, *handling tools* BBNB, *crane*, *jembatan geser*, *tools set* mekanik-elektrik, surveymeter, Alat Pelindung Diri (APD), Spektrometer Gamma dengan Hp-Ge detektor (MCA), Program GENIE-PC, sumber standar Eu-152 cair, Ba-137, Co-60, Cs-137
2. Bahan bakar nuklir bekas yang akan dideteksi

B. Cara kerja

Memastikan semua alat, bahan dan alat pelindung diri sudah siap digunakan. Memastikan di setiap tahap kegiatan dari awal hingga selesai selalu dimonitor secara kontinyu oleh Petugas Proteksi Radiasi (PPR). Mengambil sampel air kolam 500 mL sebagai *background general gamma-ray*. Memastikan air demin tersedia dan *supply* belum dioperasikan kemudian mengambil sampel air demin 500 mL. Menurunkan *tube* ke posisi bawah (basket pada posisi atas) dengan menggunakan *crane*. Setelah menentukan BBNB yang akan diuji serta mencatat nomor rak posisi BBNB. Mengeluarkan BBNB yang akan diuji-cicip dari rak menggunakan *handling tool* BBNB. Kemudian memasukkan BBNB kedalam *sipping tube* dengan menggunakan *handling tool* BBNB. Kemudian menaikkan *tube* ke posisi atas dengan menggunakan *crane* (basket posisi bawah). Mengunci *tube* padaudukannya dan mengoperasikan pompa air demin untuk mencuci BBNB dan ruang *sipping tube* dari air kolam sampai 5 kali volume *tube* atau sejumlah 275 liter.

Menghentikan proses injeksi air demin dan melakukan proses injeksi udara tekan melalui pipa fleksibel selama 2 menit untuk homogenisasi air uji dalam *sipping tube*. Kemudian menghentikan proses injeksi udara tekan dan mengambil sampel air *tube* sebagai *background* sebanyak 500mL air dalam *sipping tube* kedalam botol plastik. Menganalisis sampel air demin dengan menggunakan MCA dan melakukan *resting time* selama 4 jam (*short sipping*). Melakukan proses injeksi udara tekan selama 2 menit untuk homogenisasi air uji dalam *sipping tube*, setelah selesai *resting time* 4 jam. Mematikan proses injeksi udara tekan dan mengambil sampel larutan uji 500 mL / sesuai kebutuhan analisis dan melakukan waktu *resting time* selama 8 jam, 12 jam, dan 16 jam. Menurunkan *tube* ke posisi bawah (*basket* pada posisi atas) dengan menggunakan *crane*. Keluarkan BBNB dari basket dan kembalikan kedalam rak BBNB semula menggunakan *handling tool* dan jembatan geser.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisa radionuklida cuplikan air rendaman BBNB dilakukan dengan menggunakan Gamma Spectrometer dengan Hp-Ge detector, dengan perangkat lunak MCA (*multichannel analyzer*) dapat dilakukan analisis kualitatif, sedangkan untuk analisis secara kualitatif dan kuantitatif sistem dilengkapi dengan perangkat lunak program GENIE-PC. Waktu pencacahan selama 1 jam pencacahan. Kurva efisiensi yang dipakai untuk energi 200 sampai 1400 keV dengan sumber standar Eu -152 cair.

Kalibrasi Energi

Kalibrasi energi pada MCA dimaksudkan untuk mengubah cacahan sebagai fungsi kanal (*channel*) menjadi cacahan sebagai fungsi energi. Dengan kalibrasi energi dapat diidentifikasi jenis nuklida berdasarkan energi gamma karakteristik yang dimiliki masing masing radionuklida. Untuk melakukan kalibrasi energi digunakan sumber standar tunggal, antara lain Ba-137, Co-60, Cs-137

Kalibrasi Efisiensi

Kalibrasi efisiensi dilakukan untuk mengetahui efisiensi cacahan detektor dari energi gamma yang dipancarkan masing-masing radionuklida. Nilai efisiensi cacahan detektor yang diperoleh untuk masing-masing energi gamma selanjutnya dapat digunakan untuk menghitung konsentrasi nuklida di dalam cuplikan. Untuk dapat melakukan kalibrasi efisiensi dibutuhkan sumber

standar dengan kondisi pencacahan yang sama, yaitu wujud, geometri, energi gamma yang dipancarkan, dan waktu pencacahan yang sama dengan pencacahan cuplikan. Untuk kalibrasi efisiensi digunakan material standar cair Eu 152 cair yang merupakan nuklida pemancar gamma multi energi. Material standar digunakan untuk membuat grafik efisiensi sebagai fungsi energi. Nilai efisiensi ini dapat digunakan untuk menghitung konsentrasi masing-masing nuklida yang teridentifikasi.

Identifikasi Nuklida

Elemen bakar yang berada di kolom KH-IPSB3 satu persatu diuji cicip, untuk penelitian sekarang jumlah elemen bakar yang diperiksa ada 3 buah. Elemen bakar yang dideteksi berumur 10, 9 dan 7 tahun dan fraksi bakar yang tinggi yaitu 57,85 % ; 55,51 % ; dan 54,87 %, seperti terlihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Data Histori BBNB

No	Identifikasi BBNB	loading	unloading	Burn up (%)	Umur penyimpanan (tahun)
1.	RI-309	2004	2006	57,85	10
2	RI-358	2005	2007	55,51	9
3	RI-389	2006	2009	54,87	7

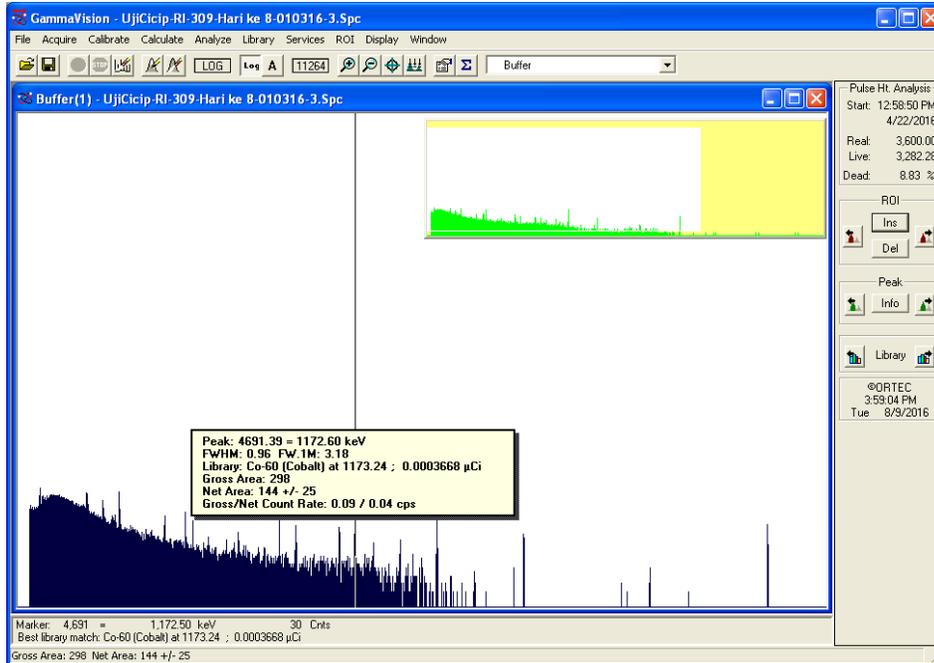
Cuplikan air rendaman elemen BBNB diambil dan dianalisis menggunakan spektrometer gamma. Hasil analisa air rendaman BBNB ditunjukkan pada Tabel 4. Identifikasi radionuklida di dalam cuplikan didasarkan pada nilai puncak spektrum yang merupakan energi gamma karakteristik masing masing nuklida. Nuklida di dalam cuplikan akan dikelompokkan ke dalam dua jenis yaitu nuklida hasil aktivasi dan nuklida hasil fisi. Kebocoran pada kelongsong elemen bakar diindikasikan dari terdeteksinya nuklida hasil fisi di dalam cuplikan air rendaman elemen bakar setelah iradiasi. Adapun nuklida hasil fisi yang digunakan sebagai indikator kebocoran adalah Cs 137 yang

mudah terdifusi keluar dari kelongsong. Radionuklida Cs-137 adalah elemen produk fisi utama yang mempunyai umur paro panjang (*long half life*), $T^{1/2} = 30,17$ tahun, yang akan meluruh menghasilkan radionuklida Ba-137. Ion Cs-137 memancarkan emisi gamma, sehingga sangat mudah terdeteksi dengan Gamma Spektrometri. Radionuklida Sr -90 adalah pemancar β yang merupakan produk hasil fisi utama yang mempunyai yield >1%, tetapi dalam hal ini tidak terdeteksi menggunakan Gamma spectrometer. Untuk analisa radionuklida Sr-90 harus menggunakan β spectrometer.

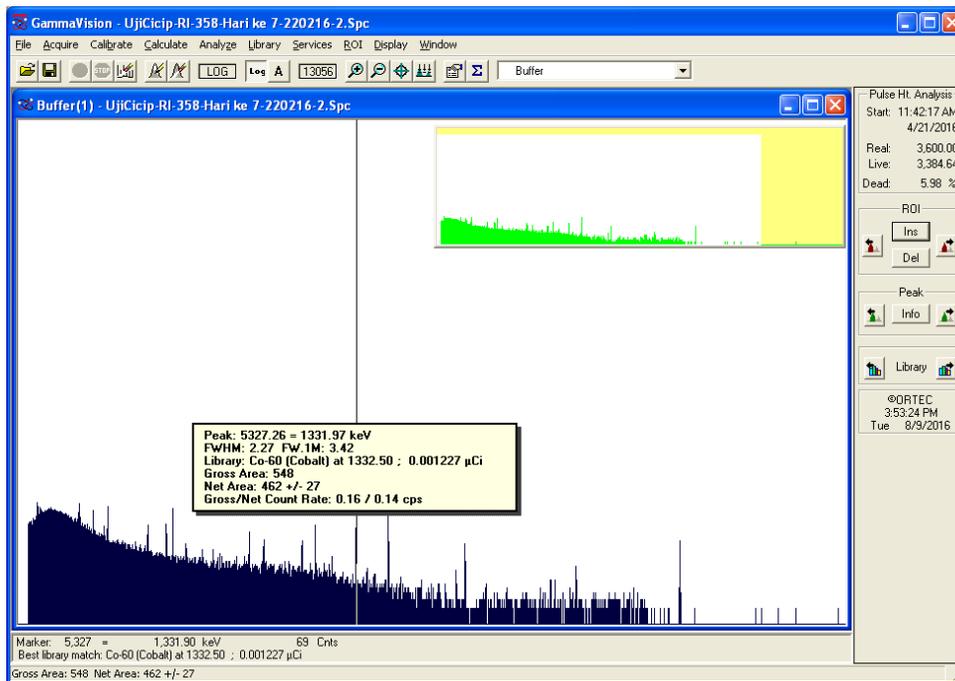
Tabel 4. Hasil Analisa air Rendaman BBNB

Pengambilan sampel	Hasil analisa menggunakan MCA $\mu\text{Ci/mL}$		
	RI-309	RI-358	RI-389
Back ground	-	-	-
Uji cicip			
- Jam Ke 4	Ttd	Ttd	Ttd
- Jam ke 22	Ttd	Ttd	Ttd
- Jam ke 46	Ttd	$\text{Co} = 1,60 \times 10^{-6}$	$\text{Co} = 1,20 \times 10^{-6}$
- Jam ke 142	$\text{Co} = 2,00 \times 10^{-6}$	$\text{Co} = 5,40 \times 10^{-6}$	$\text{Co} = 3,00 \times 10^{-6}$

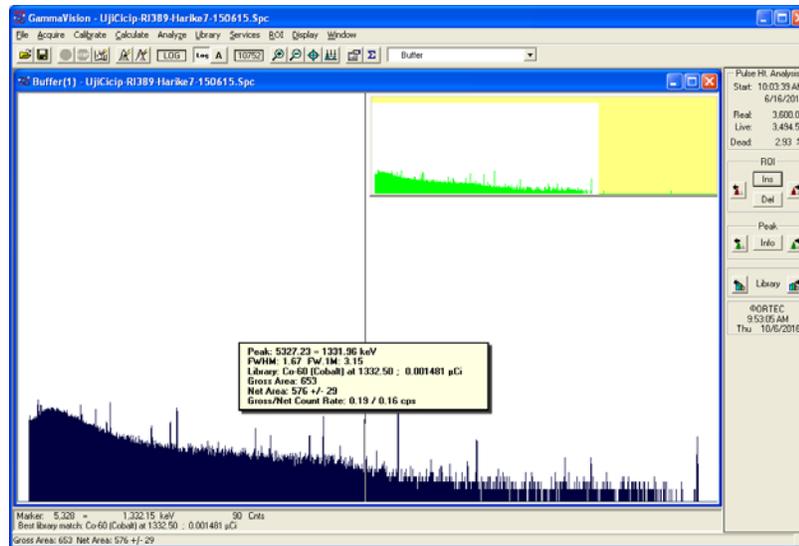
Keterangan: Batas Limit Deteksi (BLD) = $1 \times 10^{-8} \mu\text{Ci/mL}$
 Ttd = Tidak Terdeteksi / di bawah limit deteksi alat



Gambar 2. Spektrum gamma dari cuplikan rendaman air BBNB no RI-309 , rendaman selama 142 jam



Gambar 3 .Spektrum gamma dari cuplikan rendaman air BBNB no RI-358, rendaman selama 142 jam



Gambar 4. Spektrum gamma dari cuplikan rendaman air BBNB no RI-389, rendaman selama 142 jam

Pada Gambar 2 spektrum gamma dari cuplikan rendaman air BBNB no RI-309 pada rendaman selama 142 jam, yaitu puncak energi gamma dari nuklida Co-60. Pada Gambar 3 diperlihatkan spektrum gamma dari cuplikan rendaman air BBNB no RI-358 pada rendaman selama 142 jam, yaitu puncak energi gamma dari nuklida Co-60. Dari hasil analisa ternyata tidak ditemukan adanya produk fisi seperti Cs-137 dan hanya ditemukan Co-60 yang merupakan produk aktivasi di teras reaktor dan terikut di kelongsong BBNB. Fraksi bakar dari elemen bakar sangat berpengaruh pada integritas kelongsong elemen bakar. Elemen bakar nomor RI-309, RI-358 dan RI-389 di samping usianya yang sudah tua yaitu di atas 6 tahun juga telah memiliki fraksi bakar yang tinggi dengan nilai umumnya di atas 50%. Pada kondisi operasi, di dalam elemen bakar akan terbentuk gas-gas hasil fisi terutama gas mulia yang akibat adanya panas dan tekanan dapat berdifusi keluar dari pelet dan berkumpul di rongga antara pelet dengan kelongsong. Tekanan akan makin besar pada elemen bakar yang telah memiliki fraksi bakar tinggi dikarenakan jumlah hasil fisi yang berupa gas yang sudah banyak. Kelongsong elemen bakar telah dirancang untuk menahan tekanan tersebut. Di samping fraksi bakar tinggi dan umur penyimpanan, kebocoran kelongsong juga dapat terjadi karena jenis material elemen bakar itu sendiri. Dengan tidak terdeteksinya Cs 137 pada ke 3 BBNB tersebut, menunjukkan bahwa integritas BBNB masih bagus dan tidak terjadi kebocoran pada kelongsong BBNB.

KESIMPULAN

Telah dilakukan pendeteksian terhadap 3 bahan bakar nuklir bekas yaitu RI 309, RI-358, RI-389 di Kanal Hubung Instalasi Penyimpanan Sementara Bahan Bakar Nuklir Bekas, yang berbeda umur *loading unloading* dari teras reaktor dan *burn up* dari BBNB tersebut. Hasil analisa menggunakan spektrometri gamma dengan masa rendaman selama 4, 22, 46, 142 jam menunjukkan RI-309 pada masa perendaman 142 jam aktivitas jenis Co-60 = $2,0 \times 10^{-6} \mu\text{Ci} / \text{ml}$; RI-358 pada masa perendaman 142 jam aktivitas jenis Co-60 = $5,40 \times 10^{-6} \mu\text{Ci} / \text{ml}$ dan masa perendaman 142 jam, aktivitas jenis Co-60 = $5,40 \times 10^{-6} \mu\text{Ci} / \text{ml}$; dan RI-389 pada masa perendaman selama 142 jam, aktivitas jenis Co-60 = $3,0 \times 10^{-6} \mu\text{Ci} / \text{ml}$. Dari hasil analisa menunjukkan bahwa tidak terdeteksinya radionuklida hasil fisi yaitu Cs 137 pada ke 3 BBNB tersebut. Hal ini menunjukkan bahwa tidak terjadi kebocoran kelongsong BBNB dan integritas BBNB dalam keadaan baik. Sedangkan radionuklida Co-60 merupakan produk aktivasi pada teras reaktor yang terikut pada kelongsong BBNB.

DAFTAR PUSTAKA

1. Salimin, Zainus dan Gunandjar. 2010. *Pengelolaan Bahan bakar Nuklir Bekas Radioaktif sebagai Bentuk Akhir Limbah Radioaktif*. Tangerang BATAN

2. Salimin, Zainus dan Rahayu, Dyah Sulistyani. 2010. *Pengelolaan Bahan Bakar Nuklir Bekas sebagai Penentu Program Pembangunan PLTN*. Jakarta BATAN
2. Rasito, Sudjatmi K.A., dan P. Ilham Yazid, Uji Integritas Kelongsong Elemen Bakar Reaktor Triga 2000 Dengan Metode Uji Cicip Panas, Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi Nuklir PTNBR – BATAN Bandung, 3 Juni 2009
3. Rahayu, Dyah Sulistyani dan Budianti, Arie. 2011. *Pemindahan Bahan Bakar Nuklir Bekas dari Kolam Reaktor ke Cask Transnuclear Material Testing Reactor*. Jakarta: BATAN
4. Salimin, Zainus dan Rahayu, Dyah Sulistyani. 2010. *Unjuk Kerja Penyimpanan Bahan Bakar Nuklir Bekas PLTN dalam Kaitan Dengan Teknologi Penyimpanannya*. Tangerang BATAN
5. Rahayu, Dyah Sulistyani. 2012. *Pengembangan Teknologi Pengelolaan Bahan Bakar Nuklir Bekas dan Material Teriradiasi di KHIPSB3* Tangerang BATAN

VERIFIKASI PENGGUNAAN *LIBRARY* ORIGEN2.1 UNTUK PERHITUNGAN INVENTORI TERAS REAKTOR TIPE HTGR 10 MWth

Anis Rohanda, Jupiter S. Pane, Amir Hamzah

Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir (PTKRN) - BATAN
Kawasan PUSPIPTEK Gd. No. 80 Serpong, Tangerang Selatan 15310
Email: anis_rohanda@batan.go.id

ABSTRAK

VERIFIKASI PENGGUNAAN *LIBRARY* ORIGEN2.1 UNTUK PERHITUNGAN INVENTORI TERAS REAKTOR TIPE HTGR 10 MWth. Selama pengoperasian reaktor dihasilkan unsur-unsur radioaktif yang terakumulasi dalam matriks atau perangkat bahan bakar di dalam teras, disebut sebagai inventori. Perhitungan inventori dapat disimulasikan dengan *code* ORIGEN2.1 dan ORIGEN-ARP. Secara *default*, ORIGEN2.1 memiliki keterbatasan apabila diaplikasikan untuk perhitungan pada jenis reaktor berpendingin gas temperatur tinggi (HTGR). Penelitian dari MIT mengklaim mampu menggenerasi *library* ORIGEN2.1 untuk aplikasi perhitungan pada HTGR. Penelitian ini bertujuan memverifikasi penggunaan *library* tersebut, yang diberi nama 'RDE.LIB', untuk aplikasi perhitungan inventori di Reaktor Daya Eksperimental (RDE) yang merupakan tipe reaktor HTGR berdaya 10 MWth. Verifikasi dilakukan dengan membandingkan hasil perhitungan yang diperoleh ORIGEN2.1 dengan ORIGEN-ARP pada moda *library* HTGR. Komparasi dilakukan terhadap parameter massa inventori (gram) dan intensitas sumber gamma yang dihasilkan (foton/detik). Hasil verifikasi massa inventori yang dihasilkan untuk kategori produk fisi dan produk aktivasi menunjukkan tidak ada perbedaan yang signifikan (perbedaan dibawah 3%). Hasil verifikasi intensitas sumber gamma memiliki tren dan nilai yang dijustifikasi sama namun memiliki perbedaan yang cukup besar pada awal waktu pengamatan yaitu 0,1 tahun hingga 1 tahun. Secara umum, *library* 'RDE.LIB' siap dan dapat digunakan sebagai basis perhitungan inventori pada RDE atau reaktor HTGR dengan kelas daya 10 MWth.

Kata Kunci : ORIGEN2.1, *library*, HTGR, RDE

ABSTRACT

VERIFICATION OF *LIBRARY* ORIGEN2.1 APPLICATION FOR HTGR 10 MWth INVENTORY CALCULATION. During reactor operation produced radioactive elements accumulated in matrix or the fuel assemblies, referred to as inventory. Inventory calculations can be simulated with ORIGEN2.1 and ORIGEN-ARP code. By default, ORIGEN2.1 has limitations when applied to the inventory calculation for the high-temperature gas-cooled reactor (HTGR) type. Research from MIT was claimed to be capable of generating ORIGEN2.1 library for HTGR applications. This study aimed to verify the library application, named by 'RDE.LIB', for inventory calculation in Experimental Power Reactor (RDE), which is HTGR 10 MWth type. Verification was carried out by comparing the ORIGEN2.1 calculation results to ORIGEN-ARP calculation results in HTGR library mode. Comparison made against inventory mass parameter (g) and gamma source intensity (photons/s). The inventory mass verification for the fission products and activation products categories showed no significant difference (difference less than 3%). The intensity gamma sources verification indicates similar trends and can be justified same values but has a considerable difference at the beginning of the observation period about 0.1 years up to 1 year. In general, library 'RDE.LIB' ready and can be used as the basis for inventory calculation for RDE or HTGR 10 MWth power level.

Keywords: ORIGEN2.1, *library*, HTGR, RDE

PENDAHULUAN

Reaktor nuklir merupakan tempat terjadinya reaksi pembelahan atau reaksi fisi secara terkendali. Reaksi fisi terkendali akan menghasilkan sejumlah unsur radioaktif dan sejumlah energi. Unsur-unsur radioaktif yang dihasilkan terakumulasi dalam matriks atau perangkat bahan bakar di teras reaktor. Unsur-unsur radioaktif tersebut seringkali disebut sebagai inventori yang akan terus terbentuk selama pengoperasian reaktor nuklir[1]. Karakteristik dari inventori diantaranya aktivitas,

intensitas, massa dan lain sebagainya yang berguna dalam analisis keselamatan radiasi, seperti perhitungan tebal perisai radiasi, pengaturan jam kerja, penentuan dosis atau paparan radiasi, dan lain sebagainya.

Perhitungan inventori di teras reaktor nuklir dapat disimulasikan dengan menggunakan program atau kode komputer seperti ORIGEN2.1, *code* yang sangat populer digunakan untuk perhitungan deplesi dan fraksi bakar (*burn up*). ORIGEN2.1 atau *Oak Ridge Isotope GENERation and depletion code version 2.1* adalah *code* berbasis peluruhan dan

perhitungan 1 kelompok deplesi berbasis *time dependent* yang tidak mengenal bentuk geometri (*geometry independent*) sehingga kerap disebut *point codes*. Belakangan ini telah dikembangkan *code* dengan basis perhitungan sejenis yaitu ORIGEN-ARP yang dilengkapi dengan *library* berbagai reaktor daya yang ada di dunia, termasuk jenis reaktor berpendingin air (*Light Water Reactor*, LWR) dan juga reaktor berpendingin gas (*Gas Cooled Reactor*, GCR)[2]. ORIGEN-ARP merupakan salah satu program yang terdapat dalam modul SCALE5.1. SCALE5.1 adalah suatu modul yang berisikan pemodelan dan simulasi yang komprehensif terkait analisis di reaktor nuklir, yang berisikan program komputer seperti KENO3D, JAVAPENO, SAS4 dan ORIGEN-ARP. Sejauh ini, ORIGEN2 memiliki keterbatasan hanya bisa melakukan perhitungan inventori untuk jenis reaktor populer dunia seperti : *Pressurized Water Reactor* (PWR), *Boiling Water Reactor* (BWR) dan *CANadian Deuterium Uranium* (CANDU). Namun ORIGEN2.1 memiliki keunggulan dibandingkan ORIGEN-ARP, yaitu mampu mensimulasikan perhitungan inventori pada reaktor riset atau reaktor termal dan hal ini tidak dijumpai pada aplikasi penggunaan ORIGEN-ARP. Hadad K *et al* (2015) telah berhasil menggenerasi tampang lintang atau *library* ORIGEN2 yang dapat diaplikasikan pada reaktor *the Bushehr Nuclear reactor* atau BNPP yang merupakan reaktor tipe VVER-1000, tipe reaktor yang tidak memiliki *default library* di ORIGEN2.1. Hasil generasi *library* baru tersebut

divalidasi dengan perhitungan fraksi bakar dengan *code* MCNP dan dibandingkan dengan referensi data deplesi dan peluruhan radioaktif BNPP[3]. Hal tersebut menstimulasi penerapan *library* ORIGEN2 yang tepat untuk aplikasi pada Reaktor Daya Eksperimental (RDE) yang merupakan reaktor berpendingin gas temperatur tinggi sebagai salah satu program prioritas BATAN yang saat ini sedang memasuki tahapan ijin konstruksi[4]. Penelitian ini bertujuan memverifikasi penggunaan *library* HTGR yang telah berhasil digenerasi sebelumnya oleh mahasiswa MIT sebagai acuan *library* untuk perhitungan inventori[5] dan perhitungan lainnya di RDE. Verifikasi dilakukan dengan membandingkan hasil yang diperoleh dengan hasil perhitungan menggunakan ORIGEN-ARP.

METODOLOGI

Penelitian ini dilakukan dalam 4 tahapan kegiatan sebagai berikut :

1. Pendataan parameter perhitungan

Data atau parameter perhitungan yang diperlukan antara lain : daya termal, komposisi material dalam teras, basis perhitungan 18 grup energi gamma, daya operasi 10 MWth, dan waktu operasi & pengamatan setelah reaktor berhenti beroperasi. Desain RDE memiliki beberapa kesamaan dengan desain HTR module (Jerman) dan HTR-10 (Tiongkok). Parameter perhitungan ditabulasikan pada Tabel 1.

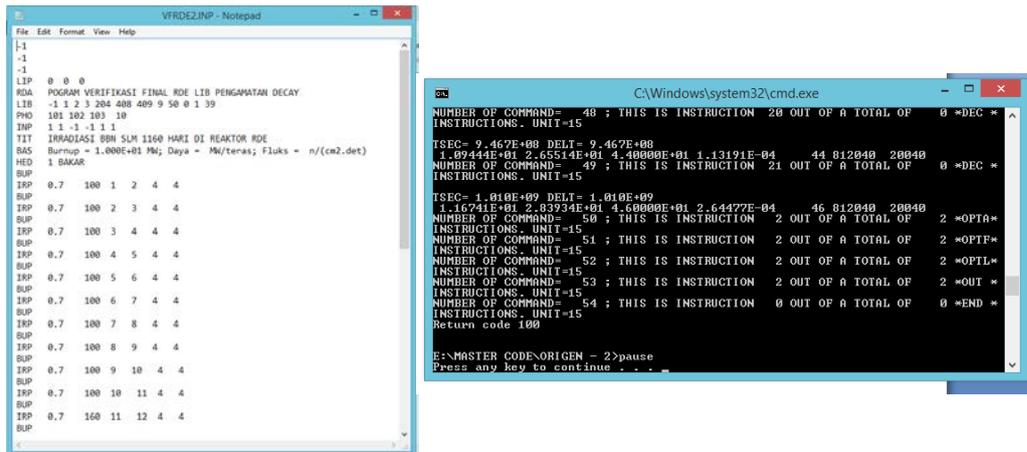
Tabel 1. Data parameter perhitungan inventori pada teras HTGR berdaya 10 MWth [6, 7, 8]

No.	PARAMETER	K E T E R A N G A N	
1	Daya termal (MWth)	10	
2	Komposisi material dalam teras (gram)	U-235	12.156,781
		U-238	59.353,694
		C	5.257.712,335
		Si	6.213,027
	O	9.635,501	
3	Grup energi gamma (grup)	18	
4	Waktu operasi reaktor (hari)	1160	
5	Waktu pengamatan (tahun)	0,1 ; 0,5 ; 1,5 ; 10, 15 ; 20 ; 25 ; 30 ; 32	

2. Simulasi perhitungan dengan ORIGEN2.1

Simulasi dilakukan dengan mengaplikasikan *library* HTGR berdaya 10 MWth yang diberi nomenklatur 'RDE.LIB' dan dengan kode foton *library* adalah '204 408 409'. RDE.LIB merupakan *library* HTGR yang digunakan sebagai basis perhitungan dan

verifikasi. RDE.LIB yang digunakan disiapkan dari *library* HTGR[5] dengan menyesuaikan format pengkodean pada bagian '*Structural Material and Activation Product Crosssection Library*' sesuai format *library* pada ORIGEN2.1. Tampilan penyiapan input dan *running* input yang disiapkan ditunjukkan pada Gambar 1.

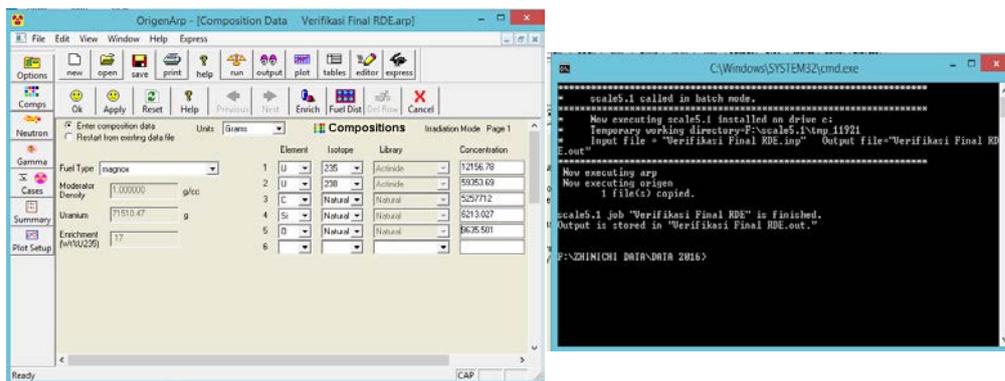


Gambar 1. Penyiapan input dan *running* input ORIGEN2.1

3. Simulasi perhitungan dengan ORIGEN-ARP

Simulasi dilakukan dengan ORIGEN-ARP pada moda AGR dengan basis *burn up* 10

MWth. Tampilan penyiapan input dan *running* input yang disiapkan ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Penyiapan input dan *running* input ORIGEN-ARP

4. Verifikasi hasil simulasi perhitungan inventori

Verifikasi dilakukan dengan membandingkan hasil perhitungan antara ORIGEN-ARP dengan ORIGEN2.1. Komparasi dilakukan terhadap parameter massa inventori (gram) dan intensitas sumber gamma yang dihasilkan (foton/detik).

inventori antara ORIGEN2.1 dengan ORIGEN-ARP pada parameter pemodelan dan perhitungan yang sama. Parameter pemodelan dan perhitungannya antara lain : massa material dalam teras, basis perhitungan 18 grup energi gamma, daya operasi 10 MWth, moda konfigurasi teras jenis HTGR dan waktu operasi & pengamatan setelah reaktor berhenti beroperasi. Verifikasi dilakukan terhadap parameter inventori hasil keluaran (*output*) berupa massa unsur (gram) dan intensitas sumber gamma yang dihasilkan (foton/detik).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Verifikasi *library* yang nantinya akan digunakan untuk basis perhitungan reaktor HTGR berdaya termal 10 MWth dilakukan dengan cara membandingkan hasil perhitungan

Hasil perhitungan inventori berupa massa unsur dalam dimensi gram ditunjukkan dalam Tabel 2.

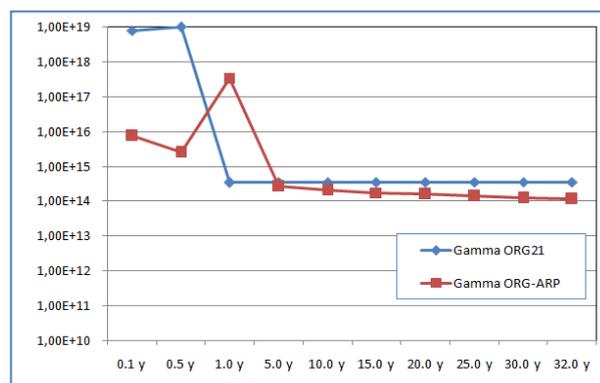
Tabel 2. Hasil pengamatan perbedaan perubahan massa inventori saat reaktor beroperasi antara hasil ORIGIN2.1 dengan ORIGIN-ARP

Waktu Pengamatan (hari)	Massa unsur (g)								
	U235			U238			O		
	ORG2.1	ORGARP	Δ (%)	ORG2.1	ORGARP	Δ (%)	ORG2.1	ORGARP	Δ (%)
100	1,21E+07	1,21E+07	0,08	5,92E+07	5,94E+07	0,19	9,64E+06	9,64E+06	0,01
200	1,20E+07	1,20E+07	0,17	5,91E+07	5,94E+07	0,39	9,64E+06	9,64E+06	0,01
300	1,19E+07	1,19E+07	0,25	5,90E+07	5,93E+07	0,57	9,64E+06	9,64E+06	0,01
400	1,18E+07	1,18E+07	0,34	5,89E+07	5,93E+07	0,78	9,64E+06	9,64E+06	0,01
500	1,17E+07	1,17E+07	0,43	5,88E+07	5,93E+07	0,96	9,64E+06	9,64E+06	0,01
600	1,16E+07	1,16E+07	0,52	5,87E+07	5,93E+07	1,15	9,64E+06	9,64E+06	0,01
700	1,15E+07	1,15E+07	0,61	5,85E+07	5,93E+07	1,35	9,64E+06	9,64E+06	0,01
800	1,14E+07	1,14E+07	0,61	5,84E+07	5,93E+07	1,53	9,64E+06	9,64E+06	0,01
900	1,13E+07	1,14E+07	0,70	5,83E+07	5,93E+07	1,72	9,64E+06	9,64E+06	0,01
1000	1,12E+07	1,13E+07	0,71	5,82E+07	5,93E+07	1,90	9,64E+06	9,64E+06	0,01
1160	1,11E+07	1,12E+07	0,80	5,81E+07	5,93E+07	2,07	9,64E+06	9,64E+06	0,01

Massa unsur yang diamati adalah unsur Uranium (U), yaitu isotop U-235 dan U-238, dan unsur Oksigen (O). U-235 berperan sebagai material fisil dan U-238 sebagai material fertil, sedangkan O mewakili material yang teraktivasi di dalam teras reaktor. Waktu pengamatan saat reaktor beroperasi dengan daya 10 MWth mulai dari 100 hari hingga 1160 hari yang merupakan EFPD (*equivalent full power days*) dari RDE yang merupakan reaktor tipe HTGR berdaya 10 MWth. Tabel 2 menunjukkan komparasi massa unsur setelah material (fisil, fertil & aktivasi) mengalami irradiasi dalam teras. Hasil komparasi menunjukkan bahwa perbedaan massa akhir pada semua unsur sangat kecil. Komparasi massa bahan fisil U-235 menunjukkan perbedaan <1%, sedangkan komparasi bahan fertil memiliki perbedaan maksimum 2,07% dan bahkan komparasi pada bahan aktivasi O menunjukkan perbedaan yang sangat kecil, yakni 0,01%. Hasil

diatas menunjukkan bahwa tampang lintang reaksi aktivasi pada *library* HTGR yang diverifikasi terhadap *library* ORIGIN-ARP yang terdapat pada modul SCALE5.1 sangat identik, dan pada tampang lintang reaksi pembelahan boleh dikatakan cukup dekat hasilnya karena perbedaan rata-rata yang hanya dibawah 2.1%. Hasil ini identik dengan verifikasi *library* yang dilakukan oleh Rohanda dkk (2014) terhadap penggunaan *library* pada perhitungan inventori berbasis reaktor jenis air tekan atau PWR[9]. Hasil verifikasi menunjukkan bahwa tidak ada perbedaan signifikan pada jumlah inventori yang dihasilkan untuk kategori produk aktivasi antara ORIGIN-ARP dengan ORIGIN2.1.

Bentuk verifikasi lain adalah melakukan komparasi terhadap intensitas sumber gamma 18 grup yang dihasilkan (foton/detik). Hasil perhitungan inventori berupa intensitas sumber gamma ditunjukkan dalam Gambar 3.



Gambar 3. Hasil verifikasi intensitas sumber gamma HTR berdaya 10 MWth

Gambar 3 menunjukkan intensitas sumber gamma yang dihitung dengan ORIGEN2.1 lebih tinggi daripada ORIGEN-ARP, terutama pada saat awal waktu peluruhan pasca reaktor beroperasi, yaitu waktu pengamatan 0,1 tahun hingga 1 tahun. Namun setelah waktu pengamatan tersebut, hingga 32 tahun, dapat dikatakan sama. Perbedaan pada awal waktu pengamatan kemungkinan disebabkan oleh perbedaan tampang lintang peluruhan radionuklida umur paro atau $T_{1/2}$ pendek, terutama radionuklida dengan $T_{1/2}$ dibawah 1 tahun. Perbedaan tampang lintang peluruhan secara langsung berimbas pada perbedaan nilai aktivitas yang dihasilkan sebagai fungsi waktu. Kode foton yang digunakan pada *library* RDE adalah 204 408 409, sesuai dengan kode foton dari referensi [5]. Informasi intensitas sumber gamma pada inventori berperan sebagai kuat sumber (*source term*) yang berguna untuk perhitungan terkait *safety*, misalnya perhitungan *release* yang diakibatkan lepasan radioaktif ke luar teras reaktor. Perhitungan *release* produk fisi dari HTR-10 yang memiliki kemiripan dengan RDE misalnya telah berhasil dilakukan oleh Liu Y, Cao J (2002)[10]. Untuk basis perhitungan terkait *safety*, misalnya untuk penentuan dosis/paparan pekerja radiasi dan perisai radiasi maka disarankan menggunakan hasil perhitungan intensitas sumber gamma yang lebih besar, yaitu hasil dari ORIGEN2.1 yang menggunakan *library* yang disiapkan sebagai *library* RDE.

KESIMPULAN

Dari hasil analisis dan pembahasan diperoleh kesimpulan bahwa secara umum, *library* 'RDE.LIB' siap dan dapat digunakan sebagai basis perhitungan massa dan jumlah inventori pada RDE atau reaktor HTGR berdaya 10 MWth. Hal ini didasarkan pada hasil verifikasi massa inventori dan intensitas sumber gamma. Hasil verifikasi massa inventori yang dihasilkan untuk kategori produk fisi dan produk aktivasi menunjukkan tidak ada perbedaan signifikan (perbedaan <3%), sedangkan hasil verifikasi intensitas sumber gamma berbasis 18 grup energi gamma pasca reaktor beroperasi yang dihasilkan memiliki tren yang sama dan nilai yang dijustifikasi sama namun memiliki perbedaan yang cukup besar pada awal waktu pengamatan (0,1 tahun - 1 tahun).

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada manajemen PTKRN karena riset ini dibiayai melalui pendanaan DIPA PTKRN FY2016.

DAFTAR PUSTAKA

1. Kelber, C., The Radiological Source Term of Nuclear Power Reactors, Nuclear Safety, Volume 27, No. 1, January-March (1986).
2. 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).
3. Kamal Hadad, Mohammadreza Nematollahi, Amin Golestani, VVER-1000 cross-section library generation for ORIGEN-II based on MCNP calculations, International journal of hydrogen energy 40 (2015) 15158e15163.
4. BATAN, Kerangka Acuan Kerja : Dokumen Teknis Keselamatan Reaktor Daya Eksperimental (RDE), PTKRN-BATAN (2014).
5. Diecker, T.J, Development of a High Temperature Gas-Cooled Reactor TRISO-Coated Particle Fuel Chemistry Model, Tesis, Massachusetts Institute of Technology (2005).
6. Zongxin Wu, Dengcai Lin, Daxin Zhong, The Design Features of the HTR-10, Institute of Nuclear Energy and Technology, Tsinghua University, Beijing100084, China, Nuclear Engineering and Design 218 (2002) 25 – 32.
7. Lohnert, G., Technical Design Features and Essential Safety-related Properties of the HTR-module. Nuclear Engineering and Design 121 (2), 259–276 (1990).
8. William K. Terry, Evaluation of The Initial Critical Configuration of The HTR-10 Pebble-Bed Reactor, HTR10-GCR-RESR-001, Idaho National Laboratory (2006).
9. Rohanda A., Hamzah A., Verifikasi Hasil Perhitungan ORIGEN-ARP Terhadap ORIGEN2.1 pada Kasus Analisis Inventori 3 Siklus Teras PLTN PWR 1000 MWe, Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah – Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir 2014, 10-11 Juni, Hal. 16-21, Yogyakarta (2014).
10. Liu, Y., Cao J., Fission Product Release and its Environment Impact for Normal Reactor Operations and for Relevant Accidents,” Nuclear Eng. and Design, 218, pp. 81-90 (2002).

PENENTUAN DENSITAS BORON KARBIDA (B_4C) MENGGUNAKAN AUTOPIKNOMETER DAN SECARA METROLOGI

Torowati, Mu`nisatun, S., Yatno Dwi Agus
PTBBN, BATAN, Kawasan Puspiptek, Serpong
Email : torowati@batan.go.id

ABSTRAK

PENENTUAN DENSITAS BORON KARBIDA (B_4C) MENGGUNAKAN AUTOPIKNOMETER DAN SECARA METROLOGI. Telah dilakukan penentuan densitas keramik boron karbida (B_4C) dengan dua metode yaitu menggunakan autopirometer dan secara metrologi. Keramik B_4C memiliki tampang lintang serap neutron yang besar. Salah satu reaktor yang menggunakan keramik B_4C sebagai batang kendali adalah reaktor Triga 2000 di Bandung. Pembuatan batang kendali untuk reaktor Triga Bandung telah dilakukan di Bidang Fabrikasi Bahan Bakar Nuklir, Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir, BATAN. Keramik B_4C untuk batang kendali harus melalui pengujian kendali kualitas, diantaranya pengujian densitas. Beberapa cara yang digunakan untuk menentukan densitas keramik B_4C adalah menggunakan autopirometer dan secara metrologi. Tujuan kegiatan ini untuk membandingkan metode penentuan densitas keramik B_4C yang mempunyai tingkat akurasi tinggi/bias rendah. Prinsip analisis menggunakan autopirometer berdasarkan hukum gas ideal $PV = NRT$ sedangkan secara metrologi berdasarkan pengukuran menggunakan jangka sorong serta menimbang bahan yang diuji. Nilai densitas ditentukan dengan membandingkan berat terhadap volume sampel. Hasil densitas keramik B_4C menggunakan autopirometer adalah: $(2.48121 \pm 0.0003) \text{ g/cm}^3$ dengan bias 0,05% sedangkan secara metrologi diperoleh: $(2.4762 \pm 0.0000) \text{ g/cm}^3$ dengan bias 0,15%. Selisih penyimpangan/bias kedua metode tersebut cukup kecil yaitu 0,10% sehingga tidak ada perbedaan yang signifikan. Dengan demikian metode metrologi dapat dipilih dalam melakukan pengujian densitas keramik B_4C karena cara penentuan lebih praktis dan lebih ekonomis, dengan syarat bentuk bahan harus beraturan, tetapi apabila bentuknya tidak beraturan maka tetap dilakukan menggunakan autopirometer.

Kata kunci : densitas, keramik B_4C , Autopirometer, metrologi

ABSTRACT

DETERMINATION OF BORON CARBIDE (B_4C) DENSITY WITH AUTOPIKNOMETER AND BY METROLOGY METHOD. Ceramic density determination has been made for boron carbide (B_4C) as material for the control rod of Triga reactor using two methods, i.e. done autopirometer and metrology method. B_4C ceramic has the nuclear reactor is for the main composition of nuclear reactor control rod because B_4C ceramic has great cross section for neutron absorption. One type of nuclear research reactor using B_4C ceramic as the main composition of the control rod is Triga reactor 2000 in Bandung. The control rods for Bandung Triga reactor has been produced by Division of Nuclear Fuel Fabrication, Center for Nuclear Fuel Technology, BATAN. B_4C ceramic for Triga control rods must be characterized through quality control testing, including density measurement. The methods used to determine the density of B_4C ceramic were the use of autopirometer and metrology. The purpose of this activity to determine which method that has higher degree of accuracy and lower bias. The principle of measurement with autopirometer is based on ideal gas law $PV = NRT$, while the metrology method is based on measurement using calipers and weighing the tested material. The density is determined by comparing the weight of the sample volume. The results show that the value of B_4C density using autopirometer is $(2.48121 \pm 0.0003) \text{ g/cm}^3$ with 0.05% bias while the value obtained in measurement by metrology method is $(2.4762 \pm 0.0000) \text{ g/cm}^3$ with a bias of 0.15%. Difference in deviation/bias for both methods is quite small or not significant at 0.10%. Thus metrology method is considered as the preferable option for testing of B_4C ceramic density since the method is in a way more practical and more economical. The metrology method is preferable particularly when the sample form is uniform, while the use of autopirometer is preferable if the sample form is more irregular.

Keywords: density, B_4C ceramics, autopirometer, metrology

PENDAHULUAN

Boron karbida (B_4C) merupakan material keramik yang sangat baik dan material ketiga terkuat setelah intan dan *cubic boron nitride* (*cubic BN*). Boron karbida memiliki beberapa sifat antara lain stabil pada temperatur tinggi, kekerasan (*hardness*) tinggi, titik lebur sekitar 2445°C , ketahanan tinggi terhadap korosi

dan oksidasi, berat yang cukup ringan, mempunyai sifat tampang lintang serapan neutron.

Material B_4C dapat dimanfaatkan di bidang non nuklir dan nuklir. B_4C mempunyai berat yang ringan maka dibidang non nuklir dapat digunakan antara lain sebagai pelindung peralatan tahan peluru serta pelapis rompi, topi serta kursi dalam pesawat tempur anti peluru.

Dibidang nuklir karena B_4C mempunyai sifat tampang lintang serapan neutron, maka digunakan sebagai penyerap neutron dan moderator neutron. B_4C digunakan sebagai bahan utama untuk pembuatan batang kendali reaktor nuklir. Hal ini dikarenakan B_4C mempunyai tampang lintang serapan neutron yang sangat besar. Batang kendali reaktor nuklir digunakan untuk mengoperasikan reaktor/start-up, mengatur tingkat daya reaktor dan mematikan reaktor.^[1]

Salah satu reaktor yang menggunakan B_4C sebagai bahan bakar adalah reaktor Triga 2000 di Bandung. Pembuatan batang kendali untuk reaktor Triga Bandung telah dilakukan di Bidang Fabrikasi Bahan Bakar Nuklir (BFBBN), Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir (PTBBN), BATAN. Penggunaan B_4C sebagai bahan utama tersebut harus melalui pengujian kendali kualitas diantaranya pengujian densitas.



Gambar 1. Keramik Boron Carbida (B_4C)

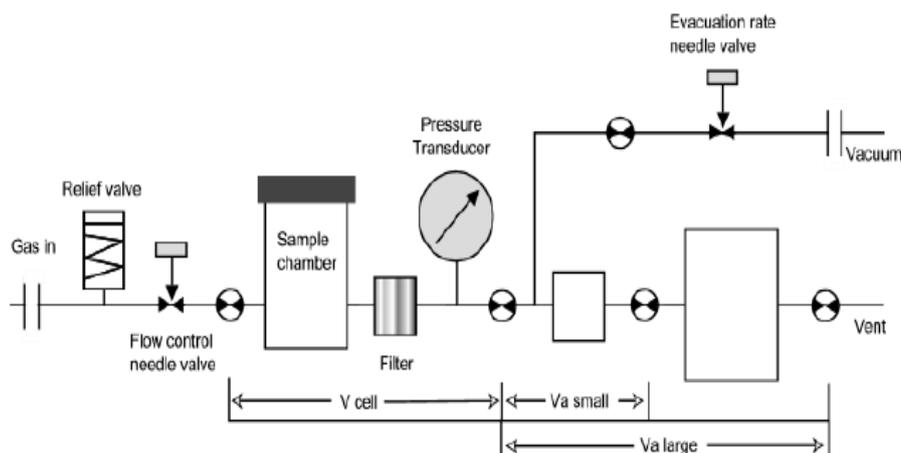
Densitas atau kerapatan dinyatakan dengan ρ (*rho*), didefinisikan sebagai massa per satuan volume. Kerapatan merupakan suatu sifat karakteristik setiap bahan murni, contohnya material murni dapat memiliki berbagai ukuran ataupun massa, tetapi kerapatannya akan sama. Satuan SI untuk kerapatan adalah kg/m^3 . Kadang kerapatan diberikan dalam g/cm^3 . Beberapa cara untuk menentukan densitas B_4C diantaranya menggunakan autopiknometer dan secara metrologi.

Penentuan Densitas Menggunakan Autopiknometer

Autopiknometer merupakan alat untuk menentukan densitas nyata/*true density* berupa padatan seperti : pelet UO_2 , paduan uranium

logam, serbuk uranium oksida dan material keramik B_4C . Komponen dalam autopiknometer antara lain; unit penganalisis (*analyzer*), unit pengendali proses manual, unit komputer dan printer.

Prinsip analisis menggunakan autopiknometer berdasarkan hukum gas ideal, $PV = NRT$ yaitu dengan mengukur perbedaan tekanan gas yang dihasilkan pada proses penetrasi gas inert helium *ultra high purity* (UHP) dalam ruang pengukuran sampel pada suhu tetap saat wadah sampel kosong dan saat berisi sampel. Perbedaan tekanan yang dihasilkan merupakan fungsi volume gas yang dipindahkan dan sebanding dengan volume sampel. Skema autopiknometer ultrapyc 1200e yang digunakan untuk analisis densitas nyata seperti Gambar 2.



Gambar 2. Skema alat autopiknometer ultrapyc 1200e

Prinsip penentuan volume menggunakan rumus hukum gas ideal sebagai berikut.^[3]
 autopiknometer (Gambar 2.) diuraikan dengan

1. Kondisi awal wadah sampel saat *valve* dibuka pada kondisi lingkungan setelah pembersihan dengan gas helium adalah :

$$P_a V_c = n_1 R T_a \dots\dots\dots (1)$$

2. Kondisi wadah sampel apabila sejumlah sampel dengan volume sebesar V_p dimasukkan maka,

$$P_a (V_c - V_p) = n_1 R T_a \dots\dots\dots (2)$$

3. Saat tekanan diposisikan di atas tekanan lingkungan dengan membuka *valve* gas helium

$$P_2 (V_c - V_p) = n_2 R T_a \dots\dots\dots (3)$$

4. Kondisi ketika *valve* penghubung wadah sampel dan volume *added* (V_{added}) dibuka maka tekanan akan turun menjadi P_3

$$P_3 (V_c - V_p + V_A) = n_2 R T_a + n_A R T_a \dots\dots\dots(4)$$

5. Selanjutnya $P_a V_A$ menggantikan $n_A R T_a$, sehingga (substitusi (1) dan (4))

$$P_3 (V_c - V_p + V_A) = n_2 R T_a + P_a V_A \dots\dots\dots(5)$$

6. Substitusi $P_2 (V_c - V_p)$ persamaan (3) untuk $n_2 R T_a$, menghasilkan.

$$P_3 (V_c - V_p + V_A) = P_2 (V_c - V_p) + P_a V_A \dots\dots\dots (6)$$

Atau

$$(P_3 - P_2) (V_c - V_p) = (P_a - P_3) V_A \dots\dots\dots(7)$$

$$(V_c - V_p) = [(P_a - P_3) V_A] / (P_3 - P_2) \dots\dots\dots(8)$$

Lalu direduksi dengan menambahkan dan mengurangkan dengan P_a pada P_2 dan P_3

$$V_p = V_c - \frac{(P_a - P_3) V_A}{(P_3 - P_a) - (P_2 - P_a)} = V_c + \frac{V_A}{1 - \frac{P_2 - P_a}{P_3 - P_a}} \quad (9)$$

sehingga, rumus yang berlaku untuk Ultrapyc 1200e

$$V_p = V_c + \frac{V_A}{1 - (P_2 / P_3)} \quad (10)$$

dengan :

- V_p = Volume sampel
- V_c = volume sel dalam keadaan tertutup
- V_A = *volume added*
- P_a = Tekanan ruang
- P_2 = tekanan saat tekanan dinaikkan diatas tekanan ambient
- P_3 = tekanan saat *valve volume added* dibuka
- n_1 = Jumlah mol gas pada tekanan ruang
- n_2 = Jumlah mol gas pada tekanan operasi
- n_3 = Jumlah mol gas pada tekanan kesetimbangan
- T_a = Suhu ruang

Pada persamaan (10) terlihat bahwa nilai V_A dan V_c sebagai nilai tetapan yang tersimpan dalam memori alat saat dilakukan perhitungan volume sampel dan secara otomatis densitas bahan yang diuji dapat langsung diketahui dari hasil analisis pada alat tersebut.

Penentuan Densitas Secara Metrologi

Penentuan densitas secara metrologi dapat dilakukan apabila bahan/sampel dalam bentuk padat beraturan seperti bentuk silinder, balok, bulat sehingga mudah dilakukan pengukuran dimensinya. Alat yang digunakan untuk pengukuran dimensi zat padat adalah skemat/jangka sorong.

Pada penentuan densitas B₄C berbentuk silinder, pengukuran dilakukan dengan menentukan diameter dan tinggi, hal ini untuk menentukan volume dari keramik B₄C dan menimbang bahan tersebut. Nilai densitas B₄C

dapat diketahui yaitu dengan membandingkan massa terhadap volume sampel B₄C. Persamaan yang digunakan untuk menentukan densitas B₄C bentuk silinder secara metrologi adalah :

$$\rho = b / V. \dots\dots\dots(11)$$

$$V = \Pi.r^2.t \dots\dots\dots (12)$$

dengan :

- V : Volume (g/cm³)
- ρ : densitas (g/cm³)
- r : jari-jari (cm)
- t : tinggi (cm)
- b : massa (g)
- Π : konstanta (3,14 atau 22/7)

Akurasi

Akurasi didefinisikan sebagai kesesuaian antara hasil pengujian dengan nilai benar dari bahan yang diuji. Nilai akurasi

ditentukan dengan cara membandingkan selisih antara nilai dari sertifikat dengan hasil pengujian terhadap nilai dari sertifikat. Persamaan untuk menentukan nilai akurasi sebagai berikut :^[4]

$$\text{Akurasi} = \{ \{ | U_s - U_a | \} / U_s \} \times 100\% \dots\dots\dots(13)$$

dengan :

- | | : tanda hasil perhitungan mutlak
- U_s : Nilai dalam sertifikat (g/cm³)
- U_a : Nilai hasil pengujian (g/cm³)

Nilai akurasi semakin kecil maka tingkat akurasi semakin tinggi karena semakin kecil nilai akurasi maka bias/kesalahan hasil

analisis semakin kecil, dengan ilustrasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.^[4]



Nilai benar

Gambar 3. Ilustrasi tingkat akurasi tinggi

Dalam Gambar 3 terlihat bahwa apabila hasil analisis sesuai/mendekati nilai benar bahan yang dianalisis, maka selisih hasil analisis dengan nilai benarnya sangat kecil sehingga nilai akurasinya akan sangat kecil pula. Nilai akurasi sering disebut dengan nilai bias.

Tujuan melakukan kegiatan ini adalah untuk menentukan/memilih/mengetahui metode penentuan densitas keramik B₄C yang mampu menghasilkan data pengujian dengan nilai akurasi tinggi/bias rendah.

METODOLOGI

1. Bahan yang dibutuhkan adalah:
 Keramik B₄C, tisu, sarung tangan karet, sarung tangan kain dan gas helium UHP.
2. Peralatan yang digunakan adalah:
 Seperangkat autopiknometer ultrapyc 1200e, timbangan analitik, seperangkat wadah sampel, skemat / jangka sorong.

3. Tata Kerja :
- A. Pengujian densitas menggunakan autopiknometer
 Bahan keramik B₄C dipecah menjadi pecahan kecil-kecil, dimasukkan ke dalam wadah sampel dan di timbang kemudian dimasukkan dalam ruang sampel autopiknometer dan ditutup rapat. Selanjutnya dilakukan pengujian sesuai dengan SOP.^[5]
- B. Pengujian densitas secara metrologi
 Bahan keramik B₄C berbentuk silinder beraturan ditimbang, kemudian diameter dan tinggi diukur menggunakan jangka sorong/skemat. Ulangi pengukuran sampai 7 kali. Nilai densitas keramik B₄C ditentukan

menggunakan persamaan (11) dan (12).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penentuan densitas keramik B₄C telah dilakukan dengan dua metode yaitu menggunakan autopiknometer ultrapyc 1200e dan secara metrologi. Penentuan densitas masing-masing dilakukan 7 kali pengulangan pengujian. Bentuk sampel yang digunakan untuk penentuan densitas menggunakan autopiknometer adalah keramik B₄C yang dipecah kecil-kecil sehingga bentuknya tidak beraturan sedangkan untuk penentuan secara metrologi, keramik B₄C yang ditentukan berbentuk silinder beraturan. Hasil densitas dengan menggunakan autopiknometer diperoleh secara otomatis dari autopiknometer tersebut. Data hasil densitas keramik B₄C menggunakan autopiknometer seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Data hasil densitas keramik B₄C menggunakan autopiknometer dengan berat sampel : 8,5282 gram

No.	Volume (cm ³)	Densitas (g/cm ³)	(densitas rerata ± SD) (g/cm ³)
1	3,4365	2,4816	2,4812±0,0003
2	3,4373	2,4811	
3	3,4370	2,4813	
4	3,4374	2,4810	
5	3,4375	2,4809	
6	3,4366	2,4816	
7	3,4377	2,4808	

Pada Tabel 1. terlihat bahwa hasil densitas rerata menggunakan autopiknometer ultrapyc 1200e diperoleh 2,4812 g/cm³ dengan standar deviasi (SD) : 0,0003 g/cm³. Densitas keramik B₄C dalam sertifikat adalah 2,48 g/cm³.^[6] Dengan menggunakan persamaan (13) maka nilai akurasi/bias diperoleh 0,05 %. Nilai akurasi/bias hasil penentuan densitas menggunakan autopiknometer cukup kecil. Dari

hasil yang diperoleh dapat dilihat bahwa alat ini memberikan hasil dengan ketelitian tinggi.

Penentuan densitas B₄C secara metrologi dilakukan dengan mengukur dimensi diameter, tinggi dan menimbang keramik B₄C yang berbentuk silinder beraturan. Pengukuran dilakukan dengan jangka sorong. Data hasil penentuan densitas keramik B₄C secara metrologi seperti pada Tabel 2.

Tabel 2. Data hasil penentuan densitas keramik B₄C secara metrologi dengan berat 109,6071 gram

No.	Diameter (mm)	Panjang (mm)	Volume (cm ³)	Densitas (g/cm ³)	Densitas rerata ± SD (g/cm ³)
1	33,55	50,05	44,2643	2,4762	(2,4762 ± 0,0000)
2	33,55	50,05	44,2643	2,4762	
3	33,55	50,05	44,2643	2,4762	
4	33,55	50,05	44,2643	2,4762	
5	33,55	50,05	44,2643	2,4762	
6	33,55	50,05	44,2643	2,4762	
7.	33,55	50,05	44,2643	2,4762	

Dengan menggunakan persamaan (11) dan (12) maka densitas B_4C secara metrologi dapat ditentukan. Hasil rerata densitas B_4C secara metrologi (Tabel 2.) diperoleh $2,4762 \text{ g/cm}^3$ dengan standar deviasi $0,0000 \text{ g/cm}^3$. Hasil pengukuran diameter dan tinggi keramik B_4C (berbentuk silinder) mempunyai permukaan rata, karena terlihat bahwa hasil pengukuran pada berbagai tempat pada silinder tersebut mempunyai hasil pengukuran yang sama sehingga nilai standar deviasinya 0. Nilai akurasi ditentukan dengan menggunakan persamaan (13) dan diperoleh sebesar 0,15%. Nilai akurasi/bias yang diperoleh secara metrologi cukup kecil, sehingga mempunyai ketelitian tinggi.

Pada penentuan densitas keramik B_4C yang dilakukan dengan dua metode perbedaannya cukup kecil yaitu 0,10%. Perbedaan ini tidak signifikan karena hasil pengujian densitas yang diperoleh dengan menggunakan autopiknometer dan secara metrologi hampir sama. Berdasarkan hasil kedua metode tersebut, maka untuk penentuan densitas keramik B_4C dengan bentuk beraturan dipilih secara metrologi karena lebih praktis dan ekonomis dibandingkan menggunakan autopiknometer. Hal ini dikarenakan penentuan secara metrologi tanpa memerlukan media lain cukup menggunakan alat jangka sorong dan neraca, sedangkan penentuan densitas menggunakan autopiknometer memerlukan gas inert yaitu gas helium *ultra high purity*. Tetapi apabila keramik B_4C dalam bentuk tidak beraturan, penentuan densitas tidak dapat dilakukan secara metrologi dan harus dilakukan menggunakan autopiknometer.

KESIMPULAN

Hasil penentuan densitas keramik B_4C dengan dua metode yaitu menggunakan autopiknometer dan secara metrologi masing-masing diperoleh $(2,4812 \pm 0,0003) \text{ g/cm}^3$ dan $(2,4762 \pm 0,0000) \text{ g/cm}^3$. Hasil kedua metode tersebut mempunyai selisih penyimpangan/bias cukup kecil yaitu 0,10% sehingga tidak ada perbedaan yang signifikan, maka pengujian secara metrologi dipilih dalam melakukan pengujian densitas keramik B_4C selama bentuk bahan yang diuji beraturan. Penentuan secara

metrologi lebih praktis dan ekonomis dibandingkan menggunakan autopiknometer karena penentuan densitas menggunakan autopiknometer memerlukan gas helium *ultra high purity* sedangkan secara metrologi tidak menggunakan media, cukup menggunakan jangka sorong dan neraca. Apabila bentuk bahan yang diuji tidak beraturan maka pengujian tetap menggunakan autopiknometer.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih disampaikan kepada BFBBN yang telah memotivasi kegiatan ini melalui DIPA tahun 2014/2015 serta kepada teman-teman kendali kualitas BFBBN yang telah membantu hingga selesainya kegiatan dan makalah ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. ABDUL ROJAK, AHMAD PAID, "Perancangan Elemen Kendali Tanpa Fuel Follower Reaktor Troga-2000 Bandung, Prosiding Seminar Pengelolaan Perangkat Nuklir Tahun 2003, PTBBN, Serpong 2003.
2. BUDI ROHMAN, "Kajian Pengaruh Kerapatan Moderator Terhadap Reaktifitas Reaktor Kartini," Prosiding PPI-PTAPB, batan, Yogyakarta, 2009
3. ANONIM, "Manual Operation of Ultrapycnometer 1000e, Microultra 1000e, Ultrapyc 1200e, Microultrapyc 120e and Ultrafoam 1000e, Ultrafoam 1200e", Quantrachrome Instrument, 2008
4. YULIA "Validasi Metode" Diktat Validasi Metode, Pusat Penelitian Kimia-LIPI, Bandung, 2010
5. MUJINEM, dkk., "SOP No. 048.003/BN 03 03/BBN 2.3 tentang Metode Pengujian Densitas Nyata Padatan Menggunakan Autopiknometer Ultrapic 1200e", PTBBN, BATAN, 2015
6. ANONIM "Quality Certificate" Xiamen Advanced & High-Tech Material Co.Ltd. 2013

EVALUASI PENGUKURAN TINGKAT KONTAMINASI PERMUKAAN MATERIAL TERKONTAMINASI UNTUK TUJUAN KLIERENS PADA LIMBAH PELAT LOGAM HASIL DEKOMISIONING FASILITAS PEMURNIAN FOSFAT PT. PETROKIMIA GRESIK

Moch Romli, Mas'udi, Sugeng Purnomo, M. Nurhasyim, T. Sulistiyo H.N., Suhartono, Imam Sasmito, L. Kwin P.

Pusat Teknologi Limbah Radioaktif-Badan Tenaga Nuklir Nasional
Kawasan Puspipstek Serpong Gedung 50, Tangerang Selatan, Banten 15310
E-mail: mrrromli@batan.go.id

ABSTRAK

EVALUASI PENGUKURAN TINGKAT KONTAMINASI PERMUKAAN MATERIAL TERKONTAMINASI UNTUK TUJUAN KLIERENS PADA LIMBAH PELAT LOGAM HASIL DEKOMISIONING FASILITAS PEMURNIAN FOSFAT PT. PETROKIMIA GRESIK Klierens merupakan pembebasan dari pengawasan BAPETEN terhadap zat radioaktif terbuka, limbah radioaktif, atau material terkontaminasi. Untuk limbah radioaktif dan juga material terkontaminasi dapat dibebaskan dari pengawasan BAPETEN apabila tingkat kontaminasi permukaan kurang dari atau sama dengan 1 Bq/cm^2 untuk kandungan radionuklida yang dapat diidentifikasi dan $0,1 \text{ Bq/cm}^2$ untuk kandungan radionuklida yang tidak dapat diidentifikasi. Limbah pelat hasil dekomisioning fasilitas pemurnian asam fosfat Petrokimia Gresik diukur menggunakan surveymeter kontaminasi permukaan MCB2. Dari hasil pengukuran tingkat kontaminasi permukaan, terdapat 65 (enam puluh lima) pelat logam atau objek ukur seberat 1226 Kg yang tingkat kontaminasi permukaannya di bawah tingkat klierens yang ditentukan.

Kata Kunci : klierens, limbah radioaktif, tingkat kontaminasi permukaan, limbah pelat, fasilitas pemurnian fosfat

ABSTRACT

EVALUATION OF SURFACE CONTAMINATION MEASUREMENT OF CONTAMINATED MATERIAL FOR CLEARANCE PURPOSE On THE METAL SCRAP WASTE OF DECOMMISSIONING RESULTS FROM PHOSPHATE PURIFICATION FACILITY OF PT. PETROKIMIA GRESIK. Clearance is an exemption from BAPETEN oversight for the open radioactive substances, radioactive waste, contaminated material. For radioactive waste and contaminated material also can be freed from supervision of Nuclear Energy Regulatory Agency if surface contamination level less than or equal to 1 Bq/cm^2 for identified radionuclide content and less than or equal to $0,1 \text{ Bq/cm}^2$ for unidentified radionuclide content. Plate waste from decommissioning of phosphate purification facility was measured use MCB2 surface contamination surveymeter. The results of surface contamination measurement, there are 65 pieces of metal scrap weighing 1226 Kg which surface contamination below the clearance value.

Keywords : clearance, radioactive waste, surface contamination level, plate waste, phosphate purification facility

PENDAHULUAN

Dalam tata kerja organisasi Badan Tenaga Nuklir Nasional, Pusat Teknologi Limbah Radioaktif (PTLR) mendapatkan tugas dalam pengendalian klierens limbah radioaktif. Dalam pelaksanaannya, tugas ini didistribusikan ke Subbidang Keselamatan Kerja dan Proteksi Radiasi, Bidang Keselamatan Kerja dan Operasi (KKPR – BKKO). Menurut Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN) Nomor 16 Tahun 2012 tentang Tingkat Klierens, Klierens adalah pembebasan dari pengawasan BAPETEN terhadap zat radioaktif terbuka, limbah radioaktif, atau material terkontaminasi atau teraktivasi. Sedangkan tingkat klierens adalah nilai yang ditetapkan oleh BAPETEN dan dinyatakan dalam konsentrasi aktivitas, pada atau di bawah nilai tersebut zat radioaktif terbuka,

limbah radioaktif, atau material terkontaminasi atau teraktivasi dapat dibebaskan dari pengawasan. (BAPETEN, 2012)

Pengendalian klierens terhadap limbah radioaktif secara garis besar dapat dikelompokkan menjadi dua yaitu pengendalian klierens limbah radioaktif pra pengolahan dan pasca pengolahan. Pengendalian klierens limbah radioaktif pra pengolahan bertujuan untuk memisahkan secara jelas limbah-limbah dari daerah aktif menjadi limbah radioaktif dan limbah klierens yang dapat dikelola sebagai limbah domestik non radioaktif. Dengan demikian pengendalian klierens limbah radioaktif pra pengolahan dapat meminimisasi jumlah limbah dari daerah aktif yang harus dikelola sebagai limbah radioaktif. Sedangkan pengendalian klierens limbah radioaktif pasca pengolahan bertujuan untuk menentukan paket-

paket limbah olahan yang karena konsentrasi aktivitasnya sudah mencapai tingkat klierens, dapat dikeluarkan dari obyek pengawasan BAPETEN.

Teknik pengukuran untuk tujuan klierens dapat dibagi menjadi 3 (tiga), yaitu pengukuran kontaminasi permukaan, pengukuran konsentrasi aktivitas secara langsung, dan pengumpulan sampel untuk dianalisis di laboratorium. Pengukuran kontaminasi permukaan dan pengukuran konsentrasi aktivitas secara langsung relatif murah dan merupakan metode yang tepat untuk dilakukan jika komposisi radionuklida yang terkandung atau melekat dalam material tertentu telah diketahui. Teknik pengukuran kontaminasi permukaan dapat dilakukan dengan 2 (dua) cara, yaitu cara langsung dan cara tidak langsung. Untuk cara langsung, alat ukur digunakan secara langsung untuk mengukur kontaminasi permukaan dari material. Dan untuk cara tidak langsung, kontaminasi yang ada di material dipindahkan ke media perantara, dan kemudian media perantara tersebut yang akan diukur menggunakan alat ukur. (IAEA, 2012)

Di dalam Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 16 Tahun 2012 dinyatakan bahwa radionuklida buatan yang hanya terdiri dari 1 (satu) radionuklida, dapat dibebaskan dari pengawasan BAPETEN apabila konsentrasi aktivitas radionuklida buatan kurang dari atau sama dengan tingkat klierens yang telah ditetapkan. Sedangkan untuk radionuklida yang terdiri lebih dari 1 (satu) radionuklida, perhitungannya mengikuti rumus yang telah diberikan di dalam peraturan tersebut. Di samping itu, untuk limbah radioaktif dan juga material terkontaminasi juga dijelaskan bahwa dapat dibebaskan dari pengawasan BAPETEN apabila tingkat kontaminasi permukaan kurang dari atau sama dengan 1 Bq/cm^2 untuk kandungan radionuklida yang dapat diidentifikasi dan $0,1 \text{ Bq/cm}^2$ untuk kandungan radionuklida yang tidak dapat diidentifikasi.

Material yang akan diukur adalah merupakan material yang berasal dari dekomisioning fasilitas pemurnian fosfat PT. Petrokimia Gresik. Bahan baku pembuatan pupuk fosfat adalah batuan fosfat yang mengandung uranium dengan konsentrasi yang relatif tinggi. Pemrosesan batuan fosfat oleh industri pupuk fosfat mengakibatkan U^{238} dan anak-anak luruhnya terdistribusi di dalam produk-produk utama, produk sampingan, dan limbah industri tersebut (Syarbaini & Bunawas, 2011). Secara umum, kegiatan klierens harus dapat dipertanggungjawabkan dengan teknik pengukuran yang tepat dan proses permohonan pengajuan klierens ke BAPETEN yang benar, karena menyangkut paparan dan dampak

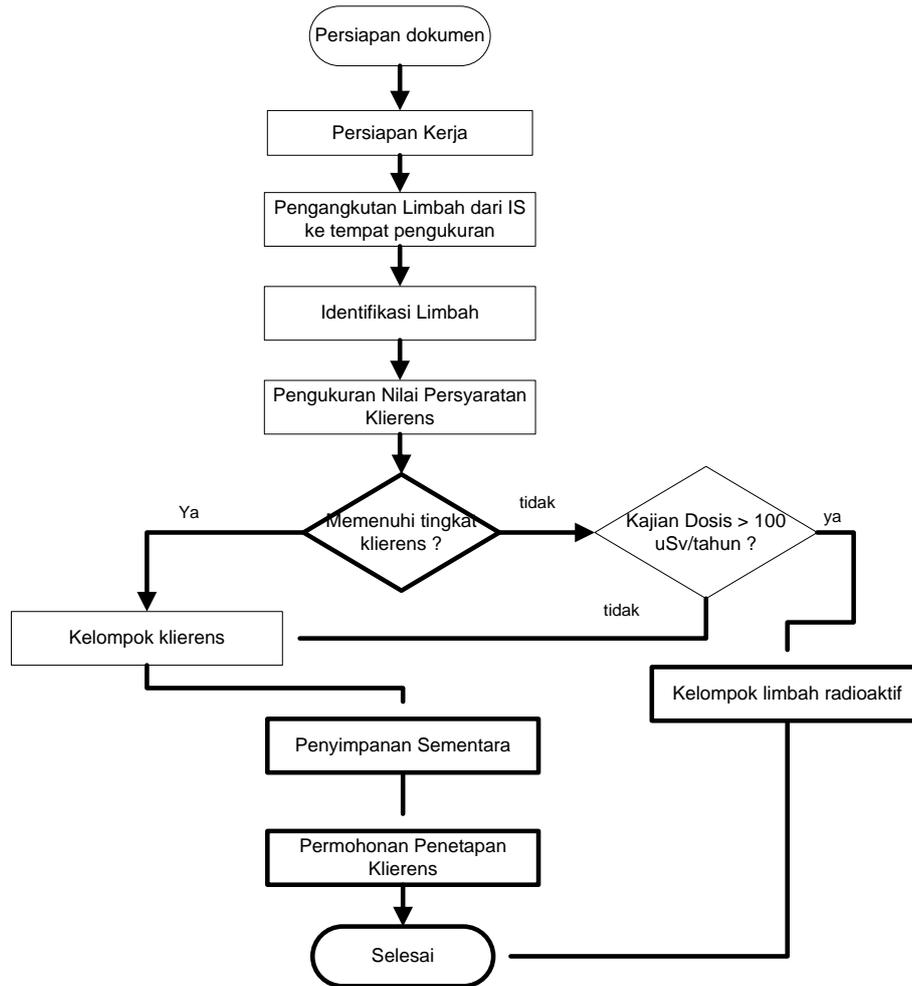
radiologik terhadap masyarakat. Tujuan dari kegiatan implementasi klierens limbah radioaktif ini adalah sebagai strategi minimisasi jumlah limbah radioaktif, sehingga dapat menghemat ruang penyimpanan sementara limbah radioaktif.

METODOLOGI

Kegiatan yang dilakukan merupakan eksperimental dengan output hasil pengukuran tingkat kontaminasi permukaan. Output tersebut dijadikan dasar dalam mengambil keputusan pengajuan penetapan klierens. Secara umum, kegiatan implementasi klierens limbah radioaktif mengikuti alur seperti pada gambar 1.

Tahapan kegiatan dimulai dengan persiapan dokumen seperti proposal kegiatan, izin kerja, dan daftar inventaris limbah yang akan diukur. Kemudian dilakukan persiapan kerja, baik itu persiapan daerah kerja maupun persiapan perlengkapan dan peralatan kerja. Daerah kerja yang digunakan adalah *airlock* limbah padat Gedung Instalasi Pengolahan Limbah Radioaktif (IPLR). Sedangkan perlengkapan dan peralatan kerja yang dibutuhkan di antaranya surveymeter, surveymeter kontaminasi, Alat Pelindung Diri (APD) seperti sarung tangan rajut, sarung tangan karet, masker, dan penutup kepala, bahan dan alat dekontaminasi, dosimeter perorangan, pencuplik udara, kertas filter & *smear test* (tes usap), alat angkat angkut (*forklift* dan *overhead crane*), kotak/ peti penyimpanan. Tahapan selanjutnya adalah pengangkutan dari *Interim Storage* ke daerah kerja pengukuran, kemudian dilakukan identifikasi limbah dengan menelusur asal usul limbah termasuk radionuklida yang terkandung di dalamnya dengan menganalisis kontaminan yang masih melekat pada beberapa objek ukur, dalam tahapan ini termasuk juga penomoran/ *coding* tiap lembar material yang diukur untuk memudahkan pembagian antara material terkontaminasi yang dapat diklierens dan yang belum dapat diklierens.

Tahapan berikutnya merupakan pengukuran nilai persyaratan klierens. Limbah pelat logam yang menjadi objek pengukuran merupakan lembaran logam yang terkontaminasi. Sesuai Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 16 tahun 2012 Pasal 6 bahwa limbah radioaktif dan material terkontaminasi yang dibebaskan dari pengawasan BAPETEN jika memiliki tingkat kontaminasi permukaan kurang dari atau samadengan 1 Bq/cm^2 . Dalam hal jika nanti jenis radionuklidadanalam sebagaimana dimaksud sebelumnya tidak dapat diidentifikasi, maka di Pasal 8 peraturan tersebut dijelaskan bahwa tingkat klierens ditetapkan kurang dari atau samadengan $0,1 \text{ Bq/gr}$ atau $0,1 \text{ Bq/cm}^2$.



Gambar 1. Alur Proses Klierens Limbah Material Terkontaminasi di PTLR

Ada 2 (dua) cara yang dapat digunakan dalam melakukan pengukuran tingkat kontaminasi permukaan, dengan pengukuran langsung maupun tidak langsung. Dalam pengukuran, khususnya pengukuran langsung, perlu diperhatikan kondisi pengukuran yang dilakukan sesuai dengan kondisi pengukuran pada saat kalibrasi surveymeter kontaminasi, di

antaranya dengan menjaga jarak sumber dengan permukaan alat ukur sebesar 3 mm. Nilai tingkat kontaminasi permukaan dari pengukuran langsung didapatkan dengan mengkonversikan hasil pembacaan surveymeter kontaminasi (misal : Bq eq) menjadi nilai tingkat kontaminasi permukaan (Bq/m²).

$$TK \text{ (Bq/m}^2\text{)} = [\text{Nilai baca alat (Bq eq)} - \text{nilai } background \text{ (Bq eq)}] * \text{Faktor konversi } \left(\frac{\text{Bq/m}^2}{\text{Bq eq}} \right)$$

TK : Tingkat Kontaminasi Permukaan

Sedang untuk pengukuran tidak langsung, dilakukan tes usap untuk bagian material terkontaminasi yang tidak memungkinkan untuk melakukan pengukuran langsung. Kemudian hasil tes usap tersebut diukur dan dihitung untuk mendapatkan nilai tingkat kontaminasi permukaan dengan memperhatikan efisiensi usap dan efisiensi pencacahan. Dalam makalah ini,

kegiatan pengukuran hanya dibatasi pada kegiatan pengukuran langsung.

Setelah didapatkan hasil pengukuran, kemudian dilakukan justifikasi apakah material terkontaminasi yang telah diukur tersebut telah memenuhi tingkat klierens atau belum. Selanjutnya material terkontaminasi yang memenuhi tingkat klierens di simpan sementara di gudang penyimpanan dan menyusun rencana

pelepasan sekaligus kajian radiologik kepada masyarakat jika dilakukan pelepasan sebagai salah satu syarat pengajuan permohonan penetapan klierens ke BAPETEN. Untuk material terkontaminasi yang belum memenuhi tingkat klierens masih diperlakukan sebagai limbah radioaktif. Dalam makalah ini ruang lingkup kegiatan klierens hanya akan dibahas sampai dengan tahapan justifikasi hasil pengukuran tingkat kontaminasi permukaan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kegiatan dekomisioning fasilitas pemurnian asam fosfat Petrokimia Gresik dilakukan pada tahun 2008. Dari kegiatan tersebut dihasilkan limbah radioaktif yang telah dikirim ke PTLR berupa (Tomo & Santoso, 2009) :

- Limbah padat dalam drum 200 liter berjumlah 69 buah drum;
 - Limbah padat dalam drum 150 liter berjumlah 25 buah drum;
 - Limbah berupa *sludge* dalam drum 150 liter berjumlah 16 buah drum;
 - Limbah *yellow cake* dalam drum 150 liter berjumlah 7 buah drum;
 - Limbah cair dalam drum 150 liter berjumlah 4 buah drum;
- Limbah padat berupa bekas peralatan seberat 2 ton dalam beberapa kotak kayu;
 - Limbah padat berupa sumber bekas berjumlah 2 buah, masing-masing seberat 50 kg;

Limbah berupa lembaran pelat merupakan bekas peralatan yang digunakan untuk preparasi umpan (asam fosfat yang mengandung uranium) sebelum diekstraksi, sehingga belum ada pemekatan kadar uranium, atau dapat dikatakan konsentrasi uranium masih sama dengan keadaan awal umpan (masih dalam kriteria *naturally occuring radioactive material*). Limbah ini terbuat dari *carbon steel* dan *stainless steel* yang terkontaminasi permukaannya telah dilakukan dekontaminasi dengan memasukkannya di dalam ruangan khusus yang berventilasi dengan sistem vakum oleh *blower* penghisap kemudian diproses dengan *chemical treatment* di dalam bak (Salimin & dkk, 2008). Setelah dilakukan proses dekontaminasi, limbah tersebut disimpan dalam *interim storage* dalam kotak/ peti yang sebagian terbuat dari kayu dan sebagian lagi telah diperbarui dengan kotak/ peti yang terbuat dari besi dengan masing-masing volume kotak/ peti sebesar 0,637 m³. Limbah inilah yang menjadi objek pengukuran untuk tujuan klierens.



Gambar 2. Kondisi Penyimpanan Limbah Pelat Hasil Dekomisioning Fasilitas Pemurnian Fosfat

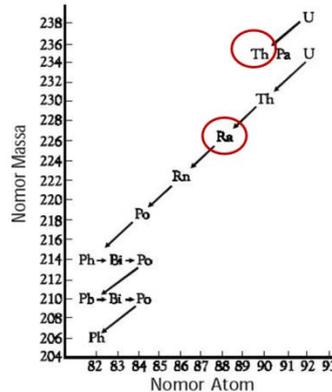
Lembaran pelat tersebut telah disimpan lama dalam *Interim Storage*, sehingga cukup banyak debu dan kotoran yang menempel dan menutupi permukaannya. Agar tidak mengganggu dalam proses pengukuran, dilakukan pembersihan kotoran-kotoran tersebut menggunakan *vacuum cleaner*. Untuk memudahkan dan memfokuskan pengukuran, lembaran pelat *carbon steel* atau *stainless steel* ini dibagi dalam beberapa kotak di kedua sisi permukaannya. Hal ini membantu dalam

pengumpulan data dan klarifikasi lapangan di kemudian hari jika diperlukan.

Pada tahap awal, dilakukan *screening* terhadap keseluruhan lembaran pelat logam tersebut. Didapatkan ada beberapa lembaran yang tingkat kontaminasi permukaannya masih tinggi. Setelah diambil sampel kontaminan yang melekat kemudian dianalisis menggunakan *Multi Channel Analyser*, didapatkan radionuklida kontaminan adalah Th-234 dan Ra-226 yang merupakan anak luruh dari U-238. Berdasarkan histori operasi dari Fasilitas Pemurnian Asam

Fosfat dan hasil analisis terhadap kontaminan, dapat dipastikan bahwa radionuklida yang mengkontaminasi pelat logam ini adalah U-238 beserta anak luruhnya. Dengan demikian, berdasarkan Peraturan Kepala BAPETEN Nomor

16 tahun 2012, bahan dan peralatan terkontaminasi memiliki batasan tingkat klerens 1 Bq/cm² untuk radionuklida kontaminan yang dapat teridentifikasi.



Gambar 3. U-238 dan anak luruhnya

Alat ukur yang digunakan dapat dibagi menjadi alat ukur tingkat kontaminasi permukaan dan alat ukur paparan radiasi radiasi. Alat ukur tingkat kontaminasi permukaan yang digunakan adalah jenis MCB2 dengan nomor serial 0144 dan 0161. MCB2 merupakan surveymeter kontaminasi yang dapat mendeteksi dan mengkuantifikasi kontaminasi alfa, beta, dan gamma. MCB2 menggunakan detektor Geiger Mueller *end window* seluas 15 cm². Kedua MCB2 tersebut telah dikalibrasi menggunakan sumber standar pemancar radiasi beta (Sr-90) dan sumber standar pemancar alfa (Am-241). Limbah yang akan diukur merupakan limbah yang terkontaminasi uranium alam, khususnya U-238, yang dominan memancarkan radiasi alfa. Sehingga dari masing-masing MCB2 tersebut hanya menggunakan faktor konversi untuk pengukuran kontaminasi pemancar alfa, yaitu

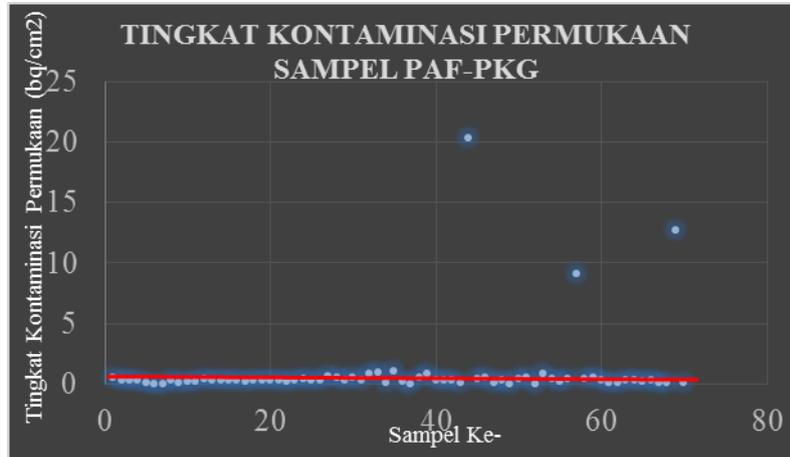
$0,057 \frac{\text{Bq/cm}^2}{\text{Bq eq}}$ untuk nomor serial 0144 dan $0,045 \frac{\text{Bq/cm}^2}{\text{Bq eq}}$ untuk nomor serial 0161. Hasil pembacaan dengan MCB2 adalah dalam satuan Bq eq, sehingga untuk mendapatkan satuan tingkat kontaminasi permukaan yang sesuai dengan persyaratan dalam Peraturan Kepala BAPETEN nomor 16 Tahun 2012, maka perlu dikonversikan menggunakan faktor konversi ke satuan Bq/cm². Hasil pengukuran dilengkapi dengan pengukuran paparan paparan radiasi masing-masing objek ukur untuk mengetahui apakah objek ukur tersebut memiliki kontribusi dalam paparan radiasi eksterna (pemancar beta & gamma). Pengukuran paparan radiasi dilakukan dengan menggunakan surveymeter Terra nomor serial 1500089 dengan faktor kalibrasi 0,957.



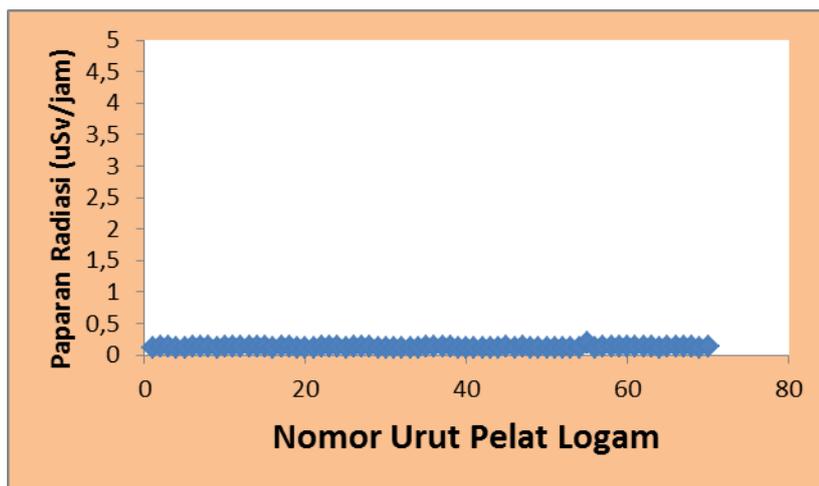
Gambar 4. Proses pembersihan kotoran dan *mapping grid* lembaran pelat¹⁾, dan pengukuran tingkat kontaminasi permukaan dan paparan radiasi²⁾

Dengan batasan tingkat kontaminasi permukaan 1 Bq/cm², dari 70 (tujuh puluh) lembar atau objek ukur, terdapat 5 (lima) lembar atau objek ukur yang masih berada di atas tingkat klierens yang ditentukan. Sedangkan hasil pengukuran paparan

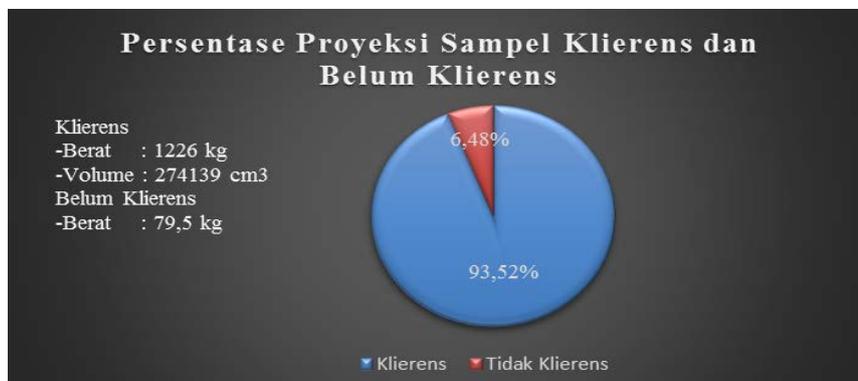
radiasi, rata-rata hasil pengukuran mendekati paparan radiasi latar belakang yaitu sekitar 0,12 – 0,14 µSv/jam. Dari hasil pengukuran, limbah pelat logam yang diproyeksikan dapat diklierens seberat 1226 Kg dengan volume kurang lebih 0,3 m³.



Gambar 5. Tingkat Kontaminasi Permukaan Pelat Logam



Gambar6. Paparan Radiasi Pelat Logam



Gambar7. Prosentasi Proyeksi Sampel Klierens dan Belum Klierens

KESIMPULAN

- a. Limbah pelat logam hasil dekomisioning Fasilitas Pemurnian Asam Fosfat merupakan bahan atau peralatan yang terkontaminasi radionuklida U-238 dan turunannya. Persyaratan tingkat klierens untuk material terkontaminasi radionuklida yang dapat diidentifikasi adalah 1 Bq/cm²;
- b. Dari hasil pengukuran, pelat logam yang diproyeksikan dapat diklierens sebanyak 65 (enam puluh lima) lembar atau objek ukur dengan total berat 1226 Kg dan volume sekitar 0,3 m³.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada manajemen PTLR yang telah memberikan dukungan materiil dan spirituil, sehingga kegiatan pengukuran tingkat kontaminasi permukaan untuk tujuan klierens ini dapat berjalan dengan lancar. Ucapan terima kasih pula kepada Bapak Dadong Iskandar yang telah memberikan pengetahuan tentang teknik pengukuran yang benar.

DAFTAR PUSTAKA

1. BAPETEN. (2012). Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 16 tahun 2012 tentang Tingkat Klierens.
2. IAEA. (2012). *Safety Report Series No. 67 "Monitoring for Compliance with Exemption and Clearance Level"*. Vienna: International Atomic Energy Agency.
3. Salimin, Z., & dkk. (2008). Dekomisioning Fasilitas Pemurnian Asam Fosfat Petrokimia Gresik. Prosiding Seminar Nasional Teknologi Pengelolaan Limbah VI, 1-15.
4. Syarbaini, & Bunawas. (2011). Klierens Limbah Padat Uranium dengan Spektrometer Gamma. *Jurnal Teknik Bahan Nuklir*, 136-148.
5. Tomo, B., & Santoso, I. (2009). Pengolahan Limbah Radioaktif Padat Hasil Dekomisioning Fasilitas Instalasi Pemurnian Asam Fosfat Petrokimia Gresik. Prosiding Seminar Nasional Teknologi Pengelolaan Limbah VII, 15-26.

EVALUASI TAHANAN PEMBUMIHAN INSTALASI PENYALUR PETIR PADA STASIUN METEOROLOGI KAWASAN NUKLIR SERPONG

Adi Wijayanto¹, Arief Yuniarto², Budihari²

Pusat Teknologi Limbah Radioaktif – BATAN,

Pusat Pendayagunaan Informatika dan Kawasan Strategis Nuklir – BATAN

Email: adi_w@batan.go.id

ABSTRAK

EVALUASI TAHANAN PEMBUMIHAN INSTALASI PENYALUR PETIR PADA STASIUN METEOROLOGI KAWASAN NUKLIR SERPONG. Pemantauan tahanan penyalur petir wajib dilakukan setahun sekali sesuai dengan Peraturan Kementrian Tenaga Kerja dan Transmigrasi No. 2 Tahun 1989. Tahanan penyalur petir merupakan peralatan vital untuk melindungi peralatan maupun bangunan dari sambaran petir. Salah satu peralatan yang ada di BATAN yang wajib dipantau tahanan penyalur petirnya yaitu Stasiun Meteorologi Kawasan Nuklir Serpong. Stasiun Meteorologi ini merupakan peralatan yang harus berfungsi selama 24 jam untuk menghasilkan data arah angin, kecepatan angin, suhu, kelembaban relative, tekanan udara, curah hujan, dan radiasi matahari secara realtime. Tinggi menara meteorologi sekitar 60 meter ini berpotensi terkena sambaran petir, sehingga perlu tahanan penyalur petir yang baik yaitu $<5\Omega$. Metode yang digunakan dalam pemantauan ini menggunakan 3 metode, metode 5 -10 segaris, metode sudut $<60^\circ$ pada 5 – 20 m, metode 62%. Hasil yang pengukuran dari ketiga metode tahanan penyalur petir pada stasiun meteorologi Kawasan Nuklir Serpong yaitu sekitar 3.41 Ω yang berarti baik. Dengan demikian tahanan penyalur petir tersebut baik dapat digunakan untuk melindungi peralatan maupun bangunan dari sambaran petir guna menunjang keselamatan instalasi.

Kata kunci : Tahanan, Penyalur Petir, Meteorologi, Keselamatan Instalasi.

ABSTRACT

EVALUATION ON THE LIGHTNING RESISTANCE INSTALLATION MONITORING SUPPLIED IN NUCLEAR STATION AREA METEOROLOGY SERPONG. Monitoring the lightning resistance must be conducted annually in accordance to the Regulation of the Ministry of Manpower and Transmigration No. 2 Year 1989. A prisoner of channeling the lightning is vital equipment to protect equipment and buildings from lightning strikes. One of the existing equipment in BATAN mandatory detention monitored channeling lightning namely Serpong Nuclear Region Meteorological Station. Meteorological stations have equipment that must function for 24 hours to produce data on wind direction, wind speed, temperature, relative humidity, air pressure, rainfall and solar radiation in real time. High around 60 meter meteorological tower is potentially exposed to lightning, so the need to arrest lightning good dealer is $<5\Omega$. The method used in this monitoring method using 3, 5 -10 inline methods, methods angle $<60^\circ$ at 5-20 m, the method was 62%. The results of the measurements of the three methods custody channeling lightning at the meteorological station area at around 3.41 Ω Serpong Nuclear which means good. Resistance lightning good dealer can be used to protect equipment and buildings from lightning strikes to support the safety of the installation.

Keywords : Resistance, Distributors Lightning, Meteorology, Safety

PENDAHULUAN

Tenaga kerja dan sumber produksi yang berada di tempat kerja perlu dijaga keselamatan dan produktivitasnya termasuk dari bahaya sambaran petir[3]. Instalasi penyalur petir merupakan peralatan vital yang harus berfungsi saat melindungi peralatan maupun bangunan dari sambaran petir. Sambaran petir dapat menimbulkan bahaya baik tenaga kerja dan orang lainnya yang berada di tempat kerja serta bangunan dan isinya

Salah satu peralatan yang ada di BATAN yang wajib dipantau tahanan penyalur petirnya yaitu Stasiun Meteorologi Kawasan Nuklir Serpong. Stasiun Meteorologi ini merupakan peralatan yang harus berfungsi

selama 24 jam untuk menghasilkan data arah angin, kecepatan angin, suhu, kelembaban relatif, tekanan udara, curah hujan, dan radiasi matahari secara realtime. Tinggi menara meteorologi sekitar 60 meter ini berpotensi terkena sambaran petir, sehingga perlu tahanan penyalur petir yang baik yaitu $<5\Omega$. Semakin kecil tahanan penyalur petir akan semakin baik sistem proteksinya.

Pemantauan tahanan penyalur petir wajib dilakukan setahun sekali sesuai dengan Peraturan Kementrian Tenaga Kerja dan Transmigrasi No. 2 Tahun 1989[3]. Tahanan penyalur petir yang baik dapat digunakan untuk melindungi peralatan maupun bangunan dari sambaran petir guna menunjang keselamatan instalasi.

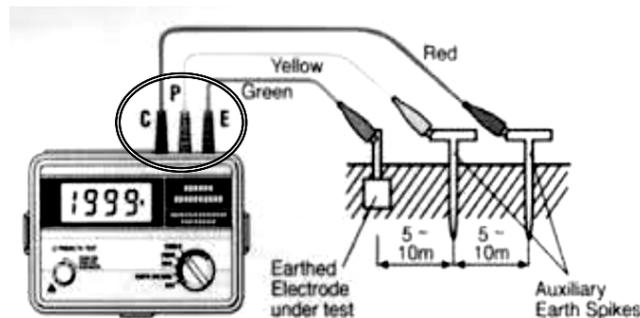
METODOLOGI

Instalasi penyalur petir ialah seluruh susunan sarana penyalur petir terdiri atas penerima (Air Terminal/Rod), Penghantar penurunan (Down Conductor), Elektroda Bumi (*Earth Electrode*) termasuk perlengkapan lainnya yang merupakan satu kesatuan berfungsi untuk menangkap muatan petir dan menyalurkannya ke bumi[3].

Pemantauan tahanan penyalur dapat menggunakan metode pengukuran sebagai berikut:

1. Metode 5 -10 Segaris
2. Metode Sudut $<60^\circ$ pada 5 – 20 m
3. Metode 62%

Peralatan yang digunakan dalam pemeriksaan dan pengujian (riksa uji) tahanan penyalur petir Kawasan Nuklir Serpong adalah Earth Tester Kyoritsu KEW4106 [1][6]. Earth Tester Kyoritsu KEW4106 ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Earth Tester Kyoritsu KEW4106 [1][6]

HASIL DAN PEMBAHASAN

Stasiun Meteorologi Kawasan Nuklir Serpong merupakan perangkat yang sangat

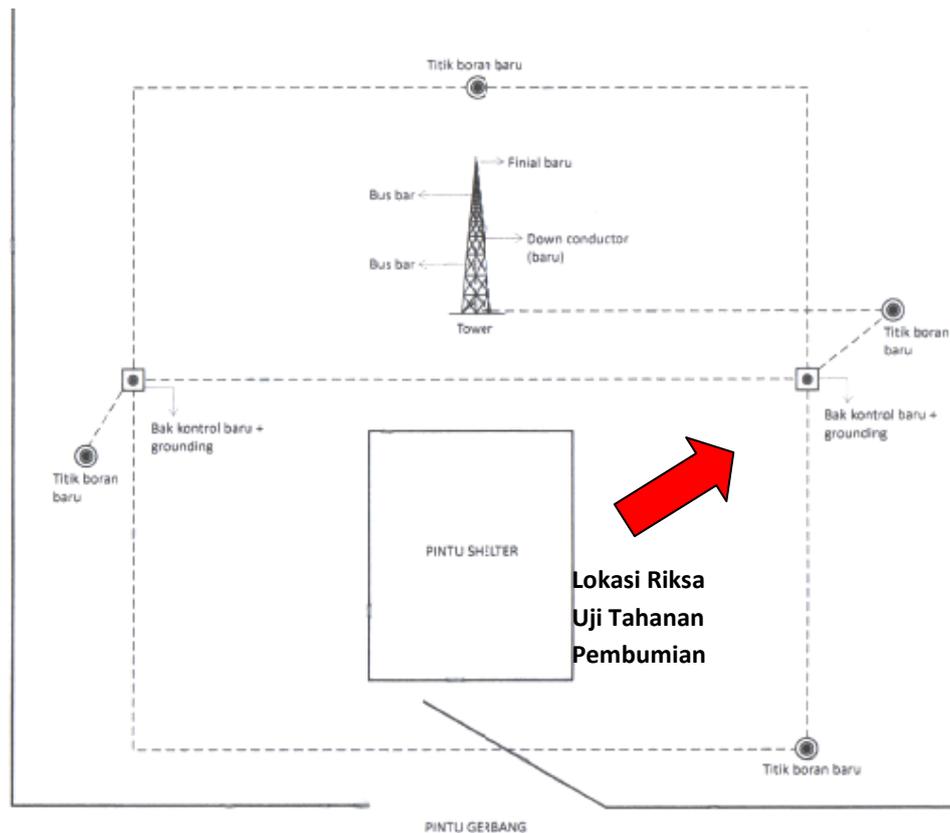
berpotensi terkena sambaran petir. Stasiun meteorologi ini berada di kawasan nuklir serpong. Stasiun Meteorologi Kawasan Nuklir Serpong ditunjukkan pada gambar 2.



Gambar 2. Stasiun Meteorologi Kawasan Nuklir Serpong [7]

Sistem meteorologi ini dilengkapi dengan instalasi penyalur petir yang dilengkapi dengan 2 bak kontrol untuk pemeriksaan dan pengujian tahanan pembumian. Lokasi Riksa Uji

Bak Kontrol Pembumian Stasiun Meteorologi Kawasan Nuklir Serpong ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Lokasi Riksa Uji Bak Kontrol Pembumian Stasiun Meteorologi Kawasan Nuklir Serpong

Pemeriksaan

Tabel 1. Pemeriksaan Bak Kontrol Pembumian Stasiun Meteorologi Kawasan Nuklir Serpong Tahun 2015

No	Gambar	Kondisi	Tindak Lanjut
1.		Kondisi bak kontrol bagian dalam bak kontrol cukup bersih	Perlu dijaga supaya tetap bersih
2.		Kondisi bak kontrol tertutup	Perlu dijaga supaya tetap tertutup

Pengujian

Tabel 2. Pengujian Resistansi/Tahanan Pembumian Stasiun Meteorologi Kawasan Nuklir Serpong Tahun 2015

Metode 5 -10 Segaris									
No	Lokasi	Waktu	Resistansi/Tahanan (Ω)						
			5-10 m	5-15 m	5-20 m	10-15 m	10-20 m		
1.	Stasiun Meteorologi	13.30	7.62	4.16	3.41	8.78	5.24		
Nilai Resistansi Tahanan			3.41						
Metode Sudut 60° pada 5 – 20 m									
No	Lokasi	Waktu	Resistansi/Tahanan (Ω)						
			5°	15°	30°	35°	45°	55°	60°
1.	Stasiun Meteorologi	13.45	3.34	3.22	3.05	2.91	2.63	3.21	3.36
Nilai Resistansi Tahanan			3.34						
Metode 62%									
No	Lokasi	Waktu	Resistansi/Tahanan (Ω)						
			32 %	42 %	52 %	62 %	72 %	82 %	
			1.3 m	2.3 m	3.3 m	4.3 m	5.3 m	6.3 m	
1.	Stasiun Meteorologi	14.00	6.14	11.85	3.23	56.2	60.2	26.6	
Nilai Resistansi Tahanan			3.23						

Interpretasi Data :

Tabel 3. Interpretasi Data Pengujian Resistansi/Tahanan Pembumian Stasiun Meteorologi Kawasan Nuklir Serpong Tahun 2015

No	Metode	Nilai (Ω)	Nilai Ambang/ Acuan
1.	Metode 5 -10 Segaris	3.41	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 5 Ω, PUIL 2000 3.13.2.10 “Resistans pembumian total seluruh sistem tidak boleh lebih dari 5 ohm. Untuk daerah yang resistans jenis tanahnya sangat tinggi, tahanan pembumian total seluruh sistem boleh mencapai 10 ohm”[2] ➤ Sekecil Mungkin, PERMENAKER No. 2 Tahun 1989 BAB V PEMBUMIAN Pasal 28 “(1) Elektroda bumi harus dibuat dan dipasang sedemikian rupa sehingga tahanan pembumian sekecil mungkin;”[3]
2.	Metode Sudut 60° pada 5 – 20 m	3.34	
3.	Metode 62%	3.23	

KESIMPULAN

Dari pemantauan tahanan penyalur petir pada stasiun meteorologi kawasan nuklir serpong Tahun 2015, Pengujian tahanan pembumian pada boks kontrol menghasilkan nilai di bawah

batasan ketentuan yang berlaku yaitu 5Ω (Baik).

Untuk menghasilkan nilai resistansi pembumian sekecil mungkin perlu dilakukan:

1. Penambahan elektroda pbumian yang dipasang paralel dengan sistem yang ada (Multiple Rod)
2. Pengkondisian tanah disekitar elektroda pbumian dengan penambahan zat aditif, seperti GEM (*Ground Enhancement Material*), Bentonit atau lainnya.
3. Peraturan Menteri Tenaga Kerja Republik Indonesia Nomor : Per.02/Men/1989 Tentang Pengawasan Instalasi Penyalur Petir
4. SNI 03-6652-2002 Tata cara perencanaan proteksi bangunan dan peralatan terhadap sambaran petir.
5. Peraturan Kepala BATAN No.200/KA/X/2012 Tentang Pedoman Pelaksanaan Penerapan Budaya Keselamatan BATAN, 2012.
6. Manual Operation Earth Tester Kyoritsu KEW4106
7. <http://223.25.97.90/radmon/>

DAFTAR PUSTAKA

1. Instruksi Kerja Pengukuran Tahanan Instalasi Penyalur Petir, Pusat Teknologi Limbah Radioaktif
2. Persyaratan Umum Instalasi Listrik (PUIL) 2000.

EVALUASI PENGENDALIAN DOSIS RADIASI PADA KEGIATAN DISMANTLING DAN PENGONDISIAN ZAT RADIOAKTIF TERBUNGKUS YANG TIDAK DIGUNAKAN

Suhartono, Moch Romli, Arie Budianti, Adi Wijayanto, Mahmudin
Pusat Teknologi Limbah Radioaktif-Badan Tenaga Nuklir Nasional
Kawasan Puspipstek Serpong Gedung 50, Tangerang Selatan, Banten 15310
E-mail: suhartono@batan.go.id

ABSTRAK

EVALUASI PENGENDALIAN DOSIS RADIASI PADA KEGIATAN DISMANTLING DAN PENGONDISIAN ZAT RADIOAKTIF TERBUNGKUS YANG TIDAK DIGUNAKAN. Telah dilakukan pengendalian dosis radiasi pada kegiatan dismantling dan pengondisian zat radioaktif terbungkus yang tidak digunakan (ZRTTD) kategori 3 – 5. Pengendalian dosis radiasi pada kegiatan dismantling dan pengondisian ZRTTD wajib dilakukan karena ZRTTD memiliki laju dosis radiasi tinggi. Kegagalan dalam pengendalian dosis radiasi pada kegiatan dismantling dan pengondisian ZRTTD dapat mengakibatkan penerimaan dosis radiasi berlebih pada pekerja radiasi yang terlibat, yang pada akhirnya dapat menyebabkan terjadinya gangguan kesehatan. Kegiatan dismantling dan pengondisian ZRTTD kategori 3 – 5 dilakukan di Pusat Teknologi Limbah Radioaktif – Badan Tenaga Nuklir Nasional (PTLR – BATAN) pada tanggal 18 – 29 Januari 2016 dengan instruktur expert International Atomic Energy Agency (IAEA). Pemantauan dosis radiasi yang diterima pekerja dilakukan dengan menggunakan thermoluminescence dosimeter (TLD) dan dosimeter personel digital yang dapat dibaca langsung. Setelah seluruh rangkaian kegiatan dismantling dan pengondisian ZRTTD selesai, dilakukan evaluasi TLD untuk mengetahui dosis efektif kumulatif yang diterima oleh pekerja radiasi. Evaluasi TLD dilakukan di laboratorium dosimetri Bidang Pemantauan Dosis Personel dan Lingkungan – Pusat Pendayagunaan Informatika dan Kawasan Strategis Nuklir – Badan Tenaga Nuklir Nasional (PPIKSN – BATAN). Berdasarkan evaluasi TLD diperoleh data bahwa dosis efektif kumulatif tertinggi yang diterima pekerja radiasi PTLR – BATAN pada kegiatan dismantling dan pengondisian ZRTTD pada tanggal 18 – 29 Januari 2016 adalah 0,31 mSv. Nilai tersebut masih berada di bawah angka pembatas dosis yang telah ditetapkan sebesar 15 mSv per tahun atau rata-rata 0,60 mSv per 10 hari kegiatan.

Kata kunci : pengendalian, dosis, dismantling, pengondisian, ZRTTD

ABSTRACT

EVALUATION OF RADIATION DOSE CONTROL IN DISMANTLING AND CONDITIONING ACTIVITY OF DISUSED SEALED RADIOACTIVE SOURCES. Control of the radiation dose in dismantling and conditioning activity of disused sealed radioactive sources (DSRS) category 3 – 5 has been done. Control of the radiation dose on DSRS dismantling and conditioning activities must be done because DSRS has a high radiation dose rate. Failure to control the radiation dose in dismantling and conditioning activities of DSRS can lead to excessive reception radiation doses for workers involved, which in turn can cause health problems. DSRS category 3-5 dismantling and conditioning activities had been performed at the Center for Radioactive Waste Technology - National Nuclear Energy Agency (PTLR - BATAN) on 18 to 29 January 2016, with expert instructors from the International Atomic Energy Agency (IAEA). Monitoring of radiation doses received by workers is done by using thermoluminescence dosimeter (TLD) and digital personnel dosimeter that can be read directly. After DSRS dismantling and conditioning activities entire series was completed, evaluation of TLD had been done to determine the cumulative effective dose received by radiation workers. TLD Evaluation was conducted in dosimetry laboratory of Personnel Dose and Environment Monitoring Division of - Centre for Administrative Information and Strategic Nuclear Zone - National Nuclear Energy Agency (PPIKSN - BATAN). Based on the evaluation of TLD, the data shows that the highest cumulative effective doses of radiation received by workers PTLR - BATAN at DSRS dismantling and conditioning activities on 18 to 29 January 2016 was 0.31 mSv. This value is still below the dose constraint set at 15 mSv per year or an average of 0.60 mSv per 10-day event.

Keywords: controlling, dose, dismantling, conditioning, DSRS

PENDAHULUAN

Pengelolaan limbah radioaktif menjadi perhatian utama dalam setiap kegiatan yang memanfaatkan zat radioaktif. Limbah radioaktif yang timbul dari pemanfaatan zat radioaktif di segala bidang harus dikelola dengan benar sesuai ketentuan yang berlaku. Hal tersebut dikarenakan

limbah radioaktif memiliki potensi bahaya radiasi yang dapat memberikan dampak negatif terhadap manusia dan lingkungannya. Limbah radioaktif adalah zat radioaktif dan bahan serta peralatan yang telah terkena zat radioaktif atau menjadi radioaktif karena pengoperasian instalasi nuklir yang tidak dapat digunakan lagi^[1].

Salah satu jenis limbah radioaktif yang banyak ditimbulkan dari kegiatan pemanfaatan zat radioaktif di bidang industri adalah zat radioaktif terbungkus yang tidak digunakan (ZRTTD). ZRTTD biasanya berupa sumber terbungkus yang dikemas dalam kapsul dengan integritas tinggi dimana di dalam kapsul mengandung radionuklida spesifik dengan derajat kemurnian tinggi. ZRTTD berasal dari sumber radiasi terbungkus yang banyak digunakan untuk keperluan industri seperti iradiator, teleterapi, brakiterapi, radiografi gamma industri, gauging ketinggian, gauging ketebalan, well logging, dan sebagainya^[2].

Sumber radioaktif dikelompokkan menjadi 5 (lima) kategori^[3]. Kategorisasi sumber radioaktif didasarkan pada rasio A/D. A adalah aktivitas radionuklida yang terdapat dalam sumber radioaktif, sedangkan D merupakan aktivitas spesifik sumber radioaktif yang dapat menyebabkan efek deterministik yang fatal untuk skenario asumsi konservatif. Kelima kategori sumber radioaktif tersebut adalah :

- a. Kategori 1. *Extremely dangerous to the person*. Sumber radioaktif yang termasuk kategori 1 memiliki rasio $A/D \geq 1000$.
- b. Kategori 2. *Very dangerous to the person*. Sumber radioaktif yang termasuk kategori 2 memiliki rasio $1000 > A/D \geq 10$.
- c. Kategori 3. *Dangerous to the person*. Sumber radioaktif yang termasuk kategori 3 memiliki rasio $10 > A/D \geq 1$.
- d. Kategori 4. *Unlikely to be dangerous to the person*. Sumber radioaktif yang termasuk kategori 4 memiliki rasio $1 > A/D \geq 0.01$.
- e. Kategori 5. *Most unlikely to be dangerous to the person*. Sumber radioaktif yang termasuk kategori 5 memiliki rasio $0.01 > A/D \geq$ (Batas Perkecualian/D).

Tabel 1 berikut ini menunjukkan kategorisasi sumber radioaktif berdasarkan rasio A/D :

Tabel 1. Kategorisasi Sumber Radioaktif Berdasarkan Rasio A/D^[3].

Category	Source ^a and practice	Activity ratio ^b (A/D)
1	Radioisotope thermoelectric generators (RTGs) Irradiators Teletherapy sources Fixed, multi-beam teletherapy (gamma knife) sources	$A/D \geq 1000$
2	Industrial gamma radiography sources High/medium dose rate brachytherapy sources	$1000 > A/D \geq 10$
3	Fixed industrial gauges that incorporate high activity sources ^c Well logging gauges	$10 > A/D \geq 1$
4	Low dose rate brachytherapy sources (except eye plaques and permanent implants) Industrial gauges that do not incorporate high activity sources ^c Bone densitometers Static eliminators	$1 > A/D \geq 0.01$
5	Low dose rate brachytherapy eye plaques and permanent implant sources X ray fluorescence (XRF) devices Electron capture devices Mossbauer spectrometry sources Positron emission tomography (PET) check sources	$0.01 > A/D$ and $A > \text{exempt}^d$

^a Factors other than A/D alone have been taken into consideration in assigning the sources to a category (see Annex I).
^b This column can be used to determine the category of a source purely on the basis of A/D. This may be appropriate, for example, if the practice is not known or is not listed, if sources have a short half-life and/or are unsealed, or if sources are aggregated (see para. 3.5).
^c Examples are given in Appendix I.
^d Exempt quantities are given in Schedule I of Ref. [1].

Ketika sumber-sumber radioaktif terbungkus yang banyak dimanfaatkan untuk keperluan industri tersebut tidak digunakan lagi, maka harus dikelola sebagai limbah radioaktif berupa ZRTTD. Potensi bahaya radiasi dari ZRTTD ini masih tinggi karena memiliki laju paparan radiasi

relatif tinggi. Terdapat 2 (dua) opsi untuk pengelolaan limbah radioaktif berupa ZRTTD yaitu mengirim kembali ke negara asal, atau dilimbahkan ke PTLR – BATAN^[1].

PTLR sebagai unit kerja di bawah BATAN yang memiliki tugas melaksanakan

perumusan dan pengendalian kebijakan teknis, pelaksanaan, pembinaan dan bimbingan di bidang pengembangan teknologi dan pengelolaan limbah banyak menerima limbah radioaktif berupa ZRTTD dari industri, rumah sakit, dan instansi penelitian/pengembangan. Sampai

dengan tahun 2015, ZRTTD kategori 1 dan 2 yang dikelola PTLR – BATAN mencapai 30 unit. Sedangkan ZRTTD kategori 3 sampai dengan kategori 5 mencapai 2546 unit. Beberapa unit ZRTTD yang dikelola PTLR – BATAN dapat dilihat pada gambar berikut ini :



Gambar 1. Beberapa jenis ZRTTD yang dikelola PTLR – BATAN.

Sebuah ZRTTD kategori 3 – 5 biasanya terdiri dari kapsul kecil berisi zat radioaktif yang memiliki derajat kemurnian tinggi dan pembungkusnya yang sekaligus berfungsi sebagai penahan radiasi. Bahan pembungkus yang banyak digunakan adalah timbal (Pb). Dimensi bahan pembungkus inilah yang menyebabkan unit ZRTTD memiliki ukuran relatif besar. Untuk efisiensi ruang penyimpanan ZRTTD yang ribuan jumlahnya dan strategi penyimpanan lestari nantinya, maka perlu dilakukan pembongkaran (*dismantling*) terhadap setiap unit ZRTTD tersebut. Kapsul-kapsul kecil berisi sumber radioaktif selanjutnya dimasukkan ke dalam kapsul *stainless steel* (SS) yang memiliki diameter 5 cm dan tinggi 12,5 cm. Setiap kapsul SS berisi 1 (satu) jenis radionuklida. Selanjutnya kapsul-kapsul SS dipengondisian ke dalam *shell* drum 200 L yang terbuat dari drum baja 200 L dengan pipa pralon 5” di tengahnya, dan cor beton di antara pipa pralon dengan drum baja 200 L.

Pertimbangan utama dalam kegiatan *dismantling* dan pengondisian ZRTTD adalah pengendalian dosis radiasi yang diterima pekerja yang terlibat. Hal ini mengingat ZRTTD memiliki laju paparan radiasi relatif tinggi. Tanpa upaya pengendalian dosis radiasi yang tepat, pekerja *dismantling* dan pengondisian ZRTTD berpotensi menerima dosis radiasi berlebih. Penerimaan dosis radiasi melebihi ketentuan berpotensi memberikan dampak negatif terhadap kesehatan pekerja yang dapat berupa munculnya efek deterministik dan meningkatnya probabilitas terjadinya efek stokastik.

Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN) Nomor 4 Tahun 2013 tentang Proteksi dan Keselamatan Radiasi dalam Pemanfaatan Tenaga Nuklir telah menetapkan batasan dosis efektif yang boleh diterima pekerja radiasi^[4] :

- Dosis Efektif rata-rata sebesar 20 mSv (duapuluh milisievert) per tahun dalam periode 5 (lima) tahun, sehingga Dosis yang terakumulasi dalam 5 (lima) tahun tidak boleh melebihi 100 mSv (seratus milisievert).
- Dosis Efektif sebesar 50 mSv (limapuluh milisievert) dalam 1(satu) tahun tertentu.

Perka BAPETEN tersebut juga menetapkan bahwa untuk memenuhi optimisasi proteksi dan keselamatan radiasi, Pemegang Izin harus menetapkan nilai pembatas dosis dengan persetujuan Kepala BAPETEN. Besarnya pembatas dosis yang ditetapkan tidak boleh melampaui nilai batas dosis (NBD) yang telah ditetapkan oleh Kepala BAPETEN. Dengan demikian pada setiap kegiatan yang menggunakan zat radioaktif dan atau sumber radiasi, harus diupayakan pekerja yang terlibat menerima dosis radiasi yang serendah-rendahnya dan tidak melebihi nilai pembatas dosis yang sudah ditetapkan. Target dosis radiasi seminimal mungkin tersebut dapat dicapai melalui penerapan teknik proteksi radiasi yang tepat.

PTLR – BATAN pada tanggal 18 – 29 Januari 2016 telah melakukan *dismantling* dan pengondisian sebanyak 262 unit ZRTTD kategori 3 – 5. Kegiatan tersebut dilaksanakan dengan instruktur 3 (tiga) orang *expert* IAEA berasal dari

Kuba. Untuk mengendalikan dosis radiasi yang diterima oleh pekerja yang terlibat, telah dilakukan upaya proteksi radiasi meliputi penggunaan *shielding* (penahan) radiasi, pengaturan jarak, dan pengaturan waktu kerja. Dengan menerapkan teknik proteksi radiasi tersebut diharapkan dosis efektif yang diterima oleh pekerja pada kegiatan *dismantling* dan pengondisian ZRTTD kategori 3 – 5 tidak melebihi pembatas dosis yang telah ditetapkan oleh Kepala PTLR sebesar 15 mSv per tahun atau rata-rata 0,60 mSv per 10 hari kegiatan^[5]. Dalam makalah ini akan dibahas teknik proteksi radiasi yang digunakan, pemantauan dosis secara langsung untuk mengatur penerimaan dosis, dan hasil evaluasi *thermoluminescence dosimeter* (TLD) untuk mengetahui dosis efektif kumulatif yang diterima pekerja pada kegiatan ini^[6].

Tujuan dari penulisan makalah ini adalah untuk mengevaluasi langkah-langkah pengendalian dosis radiasi pada kegiatan *dismantling* dan pengondisian ZRTTD. Hasil evaluasi tersebut, dapat digunakan sebagai pembelajaran untuk kegiatan-kegiatan sejenis di waktu yang akan datang.

METODOLOGI

Upaya pengendalian dosis radiasi pada kegiatan *dismantling* dan pengondisian ZRTTD kategori 3 – 5 dilakukan sejak tahapan persiapan, pada saat kegiatan berlangsung, dan setelah kegiatan *dismantling* dan pengondisian selesai dilakukan. Pada tahapan persiapan, dilakukan kajian dosis yang mungkin diterima oleh pekerja radiasi. Sebagai sumber radiasi diambil ZRTTD kategori 3 *Berthold LB 7400* karena jenis inilah yang paling banyak jumlahnya. Laju dosis dihitung menggunakan *software Rad Pro Calculator Version 3.26*. Dari tahapan ini dapat

dirancang kondisi kerja yang diinginkan agar memenuhi persyaratan proteksi radiasi.

Pada saat kegiatan *dismantling* dan pengondisian berlangsung, pemantauan dosis eksternal seluruh tubuh secara kumulatif dilakukan dengan menggunakan TLD yang dikenakan oleh setiap pekerja. Sedangkan untuk tujuan pengendalian dosis harian, dilakukan berdasarkan pemantauan dosis menggunakan dosimeter personel digital dan dosimeter pena yang dapat dibaca langsung. Dari tahapan ini dapat diketahui pekerja yang mendapatkan dosis radiasi melebihi nilai pembatas dosis harian sehingga perlu dilakukan pengaturan/rotasi jenis pekerjaan.

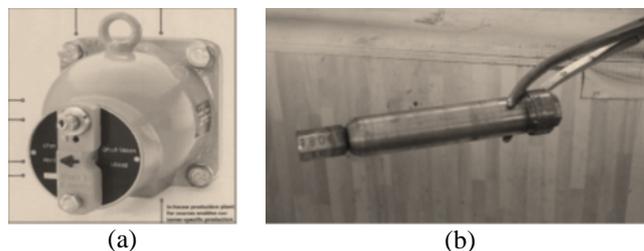
Setelah kegiatan *dismantling* dan pengondisian selesai, dilakukan evaluasi TLD dan pemantauan kemungkinan adanya radiasi internal menggunakan *Whole Body Counter* (WBC). Evaluasi TLD dan pemantauan radiasi internal menggunakan WBC dilakukan di laboratorium dosimetri Bidang Pemantauan Dosis Personel dan Lingkungan, PPIKSN – BATAN. Data dosis inilah yang digunakan untuk pencatatan riwayat dosis yang diterima pekerja.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kajian laju dosis terhadap ZRTTD

ZRTTD kategori 3 yang banyak dilimbahkan ke PTLR – BATAN adalah *level gauge* dari *Berthold System Inc, Model LB 7400*^[7]. Salah satu ZRTTD jenis ini yang relatif baru, memiliki karakteristik sumber sebagai berikut :

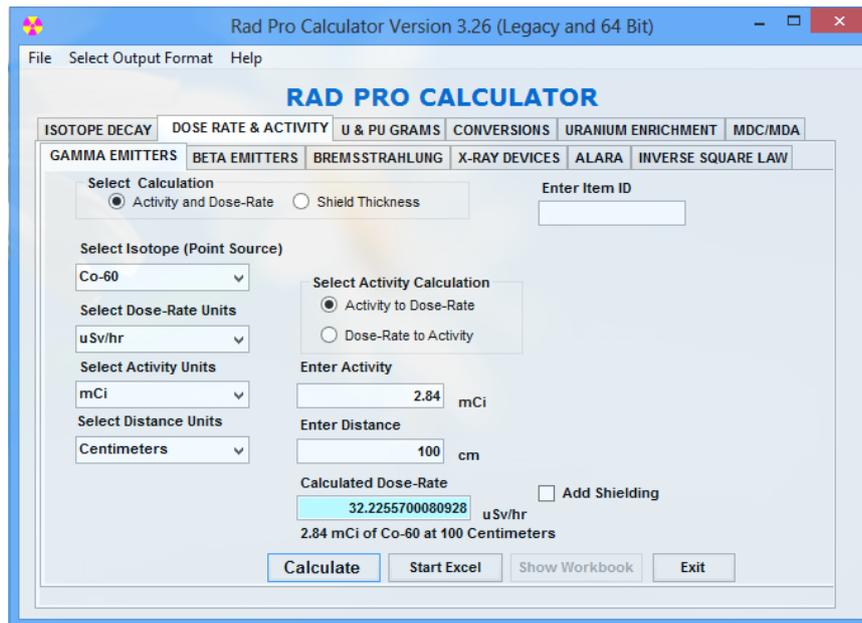
1. Jenis radionuklida : ^{60}Co
2. Aktivitas awal : 12 mCi (= 0,45 GBq)
3. Tanggal referensi : 01 Februari 2005
4. Tanggal *dismantling* : 20 Januari 2016
5. Aktivitas saat *dismantling* : 2,84 mCi (= 0,10 GBq).



Gambar 2. ZRTTD *Berthold LB 7400* (a) dan kapsul sumber radioaktif ^{60}Co (b).

Setelah dilakukan pembongkaran sehingga kondisinya menyerupai gambar 3 (b), laju dosis sumber radioaktif dapat diperkirakan menggunakan *software Rad Pro Calculator Version 3.26*.

Perhitungan menggunakan *software Rad Pro Calculator Version 3.26* pada Gambar 3 di atas menunjukkan bahwa laju dosis radiasi pada jarak 1 m dari permukaan ZRTTD *Berthold LB 7400* adalah 32,23 $\mu\text{Sv}/\text{jam}$. Angka ini melebihi batasan laju dosis aman sebesar 10 $\mu\text{Sv}/\text{jam}$ ^[8].



Gambar 3. Pengkajian laju dosis ZRTTD *Berthold LB 7400* menggunakan *software Rad Pro Calculator Version 3.26*.

Untuk pekerjaan berulang *dismantling* dan pengondisian ZRTTD sejenis *Berthold LB 7400* yang jumlahnya mencapai ratusan unit tanpa menggunakan penahan radiasi, jelas akan memberikan dosis berlebih kepada pekerja yang terlibat. Untuk itu diperlukan penahan radiasi berupa *leadbrick* dari bahan timbal (Pb) di lokasi kegiatan yang bersentuhan langsung dengan sumber radioaktif hasil pembongkaran seperti di lokasi identifikasi sumber radioaktif dan pengondisian sumber radioaktif dalam kapsul S.S. Kajian laju dosis terhadap ZRTTD *Berthold LB 7400* menggunakan *software Rad Pro Calculator Version 3.26*, pada jarak 1 m dari

permukaan sumber dan menggunakan penahan radiasi Pb setebal 5 cm menghasilkan laju dosis sebesar 2,33 $\mu\text{Sv}/\text{jam}$. Dengan nilai laju dosis sebesar 2,33 $\mu\text{Sv}/\text{jam}$, maka diharapkan batasan dosis efektif kumulatif yang akan diterima oleh pekerja tidak akan terlampaui.

Pengendalian dosis radiasi pada saat kegiatan *dismantling* dan pengondisian ZRTTD

Untuk mengendalikan dosis radiasi yang diterima oleh pekerja, digunakan teknik-teknik proteksi radiasi meliputi penggunaan penahan radiasi (*shielding*), pengaturan jarak, dan pengaturan waktu/rotasi pekerja.



Gambar 4. Penggunaan *leadbrick* setebal 5 cm dan penjepit panjang (*long tang*) untuk meminimasi dosis radiasi yang diterima.

Dosis eksterna seluruh tubuh secara kumulatif (Hp 10) yang diterima pekerja dipantau menggunakan TLD yang dikenakan oleh setiap pekerja radiasi. Untuk tujuan pemantauan dosis harian, digunakan dosimeter personel digital dan dosimeter pena yang dapat dibaca secara langsung. Dosimeter personel digital digunakan untuk memantau dosis eksterna seluruh tubuh, sedangkan dosimeter pena digunakan untuk memantau dosis radiasi yang mengenai tangan/kulit. Dari kegiatan

pemantauan dosis harian ini dapat diketahui pekerja yang menerima dosis melebihi pembatas dosis harian. Dengan demikian pada hari berikutnya, dapat diatur waktu dan kondisi kerja agar pekerja tersebut tidak mendapat dosis yang melebihi nilai pembatas dosis harian dalam 2 (dua) hari berturut-turut. Sehingga pada akhir kegiatan (10 hari kerja), dosis efektif kumulatif yang diterima oleh setiap pekerja yang terlibat tidak melebihi 0,60 mSv (= 600 µSv)^[5].

Tabel 2. Pemantauan dosis eksterna seluruh tubuh harian menggunakan dosimeter personel digital.

NO	PETUGAS	PEMANTAUAN DOSIS EKSTERNA (Hp 10) HARIAN MENGGUNAKAN DOSIMETER DIGITAL (µSv)										
		18/01	19/01	20/01	21/01	22/01	25/01	26/01	27/01	28/01	29/01	TOTAL
1	A	0	3	30	33	0	9	55	35	13	0	178
2	B	0	6	56	74	0	37	54	25	58	0	310
3	C	0	7	13	33	0	8	19	12	15	0	107
4	D	0	7	83	33	0	88	92	43	0	0	346
5	E	0	7	116	24	0	58	21	58	58	0	342
6	F	0	7	56	24	0	58	92	19	5	0	261
7	G	0	7	56	7	0	18	63	58	27	0	236
8	H	0	0	0	14	0	22	29	13	58	0	136
9	I	0	2	68	12	0	16	14	8	0	0	120
10	J	0	7	0	14	0	48	83	28	0	0	180
11	K	0	7	22	15	0	16	14	8	5	0	87
12	L	0	2	29	8	0	16	6	8	8	0	77
13	M	0	1	14	9	0	13	9	16	18	0	80
14	N	0	7	30	33	0	18	14	24	21	0	147
15	O	0	0	0	0	0	50	38	35	21	0	144
16	P	0	2	80	33	0	23	52	73	21	0	284

Berdasarkan data pada Tabel 2 di atas, terlihat bahwa dosis efektif yang diterima pekerja pada kegiatan *dismantling* dan pengondisian ZRTTD kategori 3 – 5 pada tanggal 18 – 29 Januari 2016 dalam kondisi terkendali. Terdapat beberapa pekerja yang pada hari tertentu menerima dosis eksterna seluruh tubuh melebihi nilai pembatas dosis harian sebesar 60 µSv namun setelah dilakukan upaya pengaturan waktu dan kondisi kerja, pada hari berikutnya tidak menerima dosis yang melebihi nilai pembatas dosis harian. Demikian pula secara kumulasi, hasil pemantauan dosis eksterna harian pada masing-masing pekerja yang terlibat tidak melebihi nilai pembatas dosis untuk 10 hari kegiatan sebesar 0,60 mSv (= 600 µSv)^[5].

Pemantauan dosis ekivalen pada tangan/kulit menggunakan dosimeter pena menunjukkan dosis ekivalen kumulatif tertinggi sebesar 1,11 mSv (= 1110 µSv). Nilai dosis ekivalen untuk tangan/kulit ini tidak melebihi nilai batas dosis (NBD) untuk tangan/kulit yang telah ditetapkan oleh Kepala BAPETEN sebesar

500 mSv per tahun atau rata-rata 20 mSv per 10 hari kegiatan^[4].

Hasil evaluasi TLD dan pemantauan radiasi internal

Pemantauan dosis eksterna seluruh tubuh harian menggunakan dosimeter personel digital yang dapat dibaca langsung bertujuan untuk mengatur/ mengendalikan dosis radiasi yang diterima oleh pekerja pada saat melakukan *dismantling* dan pengondisian ZRTTD kategori 3 – 5. Sedangkan dosis efektif kumulatif pada periode tertentu yang diterima oleh pekerja radiasi diperoleh dari hasil evaluasi TLD dan pemantauan radiasi internal. Data dari hasil evaluasi TLD dan pemantauan radiasi internal inilah yang kemudian digunakan untuk pencatatan riwayat dosis yang diterima setiap pekerja radiasi. Evaluasi TLD dan pemantauan radiasi internal pekerja radiasi PTLR – BATAN dilakukan di laboratorium dosimetri Bidang Pemantauan Dosis Personel dan Lingkungan, PPIKSN – BATAN. Berdasarkan pemantauan radiasi internal menggunakan *WBC* terhadap

pekerja radiasi PTLR yang terlibat dalam kegiatan *dismantling* dan pengondisian ZRTTD kategori 3 – 5 pada tanggal 18 – 29 Januari 2016, tidak didapati adanya kontaminasi zat radioaktif secara internal. Sedangkan dosis efektif tertinggi yang diterima oleh pekerja adalah 0,31 mSv (= 310 μ Sv). Nilai dosis efektif tersebut tidak melebihi nilai pembatas dosis yang berlaku di PTLR sebesar 15 mSv per tahun atau rata-rata 0,60 mSv (= 600 μ Sv) untuk kegiatan selama 10 hari kerja^[5].

KESIMPULAN

Upaya pengendalian dosis radiasi pada kegiatan *dismantling* dan pengondisian ZRTTD kategori 3 – 5 pada tanggal 18 – 29 Januari 2016 di PTLR – BATAN telah berhasil dilakukan dengan baik. Upaya pengendalian dosis radiasi tersebut dimulai sejak tahap persiapan berupa pengkajian laju dosis; tahapan pelaksanaan dengan menerapkan teknik proteksi radiasi meliputi penggunaan penahan (*shielding*) radiasi, pengaturan jarak, dan pengaturan waktu/rotasi pekerja; dan tahapan pasca kegiatan berupa evaluasi TLD dan pemantauan radiasi internal.

Keberhasilan upaya pengendalian dosis radiasi pada kegiatan *dismantling* dan pengondisian ZRTTD kategori 3 – 5 ditandai dengan tidak adanya pekerja yang mendapatkan dosis radiasi berlebih. Dosis efektif tertinggi yang didapatkan pekerja adalah 0,31 mSv (= 310 μ Sv). Nilai dosis efektif ini jauh di bawah nilai pembatas dosis di PTLR - BATAN yang sudah ditetapkan yaitu sebesar 15 mSv per tahun atau rata-rata 0,60 mSv (= 600 μ Sv) per 10 hari kegiatan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih kepada rekan-rekan petugas *dismantling* dan pengondisian ZRTTD, seluruh staf Bidang Pemantauan Dosis Personel dan Lingkungan (BPDPL) – Pusat

Pendayagunaan Informatika dan Kawasan Strategis Nuklir (PPIKSN), serta manajemen PTLR – BATAN sehingga kegiatan ini dapat terlaksana dengan lancar dan selamat.

DAFTAR PUSTAKA

1. Anonim, Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 61 Tahun 2013 tentang Pengelolaan Limbah Radioaktif, (2013).
2. Anonim, *IAEA-TECDOC-1690 Review of Sealed Source Designs and Manufacturing Techniques Affecting Disused Source Management*, (2012) 2 – 20.
3. Anonim, *IAEA Safety Standards Series No. RS-G-1.9 Categorization of Radioactive Sources*, (2005) 4 – 33.
4. Anonim, Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 4 Tahun 2013 tentang Proteksi dan Keselamatan Radiasi Dalam Pemanfaatan Tenaga Nuklir, (2013).
5. Anonim, Program Proteksi dan Keselamatan Radiasi Instalasi Pengolahan Limbah Radioaktif (IPLR) PTLR – BATAN, (2015).
6. Toto Trikasjono, dkk., Studi Penerimaan Dosis Eksterna pada Pekerja Radiasi di Kawasan BATAN Yogyakarta, Seminar Nasional IV SDM Teknologi Nuklir, STTN – BATAN Yogyakarta 25 – 26 Agustus 2008.
7. Anonim, *IAEA - Technical Manual on Dismantling Industrial Gauges, Recovering and Conditioning of Associated Radioactive Sources, Version : V03.f*, (2015) 71 – 81.
8. Anonim, Pedoman Keselamatan dan Proteksi Radiasi Kawasan Nuklir Serpong, Revisi 1, Komisi Proteksi Radiasi Kawasan Nuklir Serpong, (2011) 43 - 63.

PENERIMAAN DOSIS RADIASI SEBAGAI INDIKATOR KESELAMATAN DALAM PROSES PENGOLAHAN LIMBAH RADIOAKTIF TAHUN 2015

L. Kwin Pudjiastuti, Hendro, Suhartono, Arie Budianti
Pusat Teknologi Limbah Radioaktif-Badan Tenaga Nuklir Nasional
Kawasan Puspiptek Serpong Gedung 50, Tangerang Selatan, Banten 15310
E-mail: kwin@batan.go.id

ABSTRAK

PENERIMAAN DOSIS RADIASI SEBAGAI INDIKATOR KESELAMATAN DALAM PROSES PENGOLAHAN LIMBAH RADIOAKTIF TAHUN 2015. Risiko bekerja dengan bahan radioaktif adalah penerimaan dosis radiasi pada pekerja yang menanganinya. Salah satu indikator kegiatan proses pengolahan limbah radioaktif berjalan dengan aman dan selamat dapat dievaluasi dari penerimaan dosis radiasi pekerja yang menanganinya, sehingga pemantauan terhadap penerimaan dosis radiasi pekerja perlu mendapat perhatian secara terus menerus. Penelitian ini dilaksanakan dengan menggunakan data sekunder yaitu hasil pengukuran laju dosis daerah kerja serta laju dosis limbah radioaktif yang diproses selama tahun 2015. Laju dosis dibandingkan dengan hasil penerimaan dosis radiasi pekerja pada periode yang sama (empat kali periode pemantauan) kemudian dibandingkan juga dengan batasan tahunan penerimaan dosis radiasi bagi pekerja radiasi. Dari hasil evaluasi penerimaan dosis radiasi pekerja selama tahun 2015 adalah sebesar antara 0 mSv – 0,91 mSv, dengan rerata sebesar 0,16 mSv. Sedangkan laju dosis daerah kerja saat proses pada tahun 2015 tertinggi di daerah *Interm Storage* (IS) sebesar 3,32 μ Sv/jam. Penerimaan dosis radiasi pekerja yang menangani proses penataan limbah radioaktif di IS yaitu rerata sebesar 0,28 mSv, namun masih jauh dibawah nilai batas dosis tahunan yaitu 20 mSv. Dengan demikian penerimaan dosis pekerja selama proses pengolahan limbah radioaktif tidak ditemukan adanya penerimaan dosis radiasi yang melebihi batasan tahunan yang diijinkan. Penerimaan dosis radiasi sebagai salah satu indikator keselamatan dalam proses pengolahan limbah radioaktif tetap terjamin.

Kata Kunci : dosis radiasi, keselamatan, limbah radioaktif.

ABSTRACT

ACCEPTANCE OF RADIATION DOSE AS INDICATORS OF SAFETY IN RADIOACTIVE WASTE PROCESSING IN 2015. *The risk of working with materials radioaktif is acceptance of radiation doses to workers who handle. One indicator of activity radioactive waste treatment processes running safely and securely can evaluated from the radiation dose that workers receipt that they are handle, so that the monitoring of the radiation dose reception worker needs continuous attention. This research was conducted using secondary data, ie the measurement result the dose rate of work areas and the dose rate radioactive waste in prosess during 2015. This dose rate are compared with radiation dose of workers in the same period (four times the monitoring period) and also compared with limits annual dose radiation yearly. The evaluation of radiation dose during 2015 is between 0 mSv until 0.91 mSv. With the average radiation dose is 0.16 mSv. While the highest dose rate process on working area at 2015 in Interm Storage is 3.32 μ Sv/h. The average acceptance of radiation dose to workers who handle radioactive waste process is 0.28 mSv, it is still far below the value of the annual dose limit of 20 mSv. Thus the radiation dose of worker who handle radioactive waste treatment process, their reception radiation dose which exceeds the permitted annual limits is not found, The acceptance of radiation dose as one of an indicator of safety in the processing of radioactive waste is ensured.*

Keywords : radiation dose, safety, radioactive waste

PENDAHULUAN

Limbah menjadi permasalahan pada setiap kegiatan, baik dalam industri maupun institusi penelitian dan pengembangan, tidak terkecuali pada kegiatan pengolahan limbah radioaktif. Pengelolaan limbah radioaktif di Indonesia di pusatkan di Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) sebagai badan pelaksana dan secara teknis dilaksanakan oleh Pusat Teknologi Limbah Radioaktif (PTLR), hal tersebut tertuang dalam Undang Undang Nomor 10 tahun 1997 tentang Ketenaganukliran pasal 23. Dalam undang undang tersebut, yang dimaksud dengan

pengelolaan limbah radioaktif adalah kegiatan pengumpulan, pengelompokan, pengolahan, pengangkutan, penyimpanan, dan/atau pembuangan limbah radioaktif, merupakan rangkaian kegiatan yang dilakukan secara berurutan. Pengelolaan limbah radioaktif dilaksanakan untuk mencegah timbulnya bahaya radiasi terhadap pekerja, masyarakat, dan lingkungan hidup di sekitarnya. Selain itu dalam pengelolaan limbah wajib memperhatikan keselamatan, keamanan, dan ketenteraman, kesehatan pekerja dan anggota masyarakat, serta perlindungan terhadap lingkungan hidup. Sebagaimana diketahui limbah radioaktif adalah

zat radioaktif dan bahan serta peralatan yang telah terkena zat radioaktif atau menjadi radioaktif karena pengoperasian instalasi nuklir yang tidak dapat digunakan lagi, [1] sehingga limbah radioaktif harus dikelola dengan baik agar tidak membahayakan bagi pekerja, masyarakat dan lingkungannya.

Kata radioaktif bagi masyarakat umum merupakan hal yang menakutkan, yang identik dengan bom radiasi yang dapat menyebabkan kematian, namun disisi lain apabila radiasi dapat di kelola dengan baik, maka akan memberikan manfaat bagi kesejahteraan masyarakat. Beberapa contoh manfaat radiasi dalam bidang kesehatan misalnya untuk terapi menggunakan alat radioterapi dimana alat tersebut terdapat sumber yang dapat memancarkan radiasi. Dalam bidang industri radiasi dapat dimanfaatkan salah satunya untuk mengetahui kerapatan suatu bahan, sedangkan dalam bidang pertanian radiasi dapat untuk mengawetkan biji-bijian agar tidak cepat bertunas serta banyak jenis manfaat yang lainnya. [2]

Untuk dapat mengelola radiasi perlu di ketahui tentang persyaratan proteksi radiasi yang terdiri dari justifikasi, optimisasi dan limitasi. Justifikasi memberikan arti bahwa setiap kegiatan yang menggunakan radiasi perlu dipertimbangkan dapat memberikan manfaat yang sebesar-besarnya, penerapan teknologi yang digunakan dengan risiko yang ditimbulkan lebih kecil dari yang sudah ada sebelumnya. Justifikasi juga harus mempertimbangkan faktor ekonomi, sosial, keselamatan dan kesehatan serta pengelolaan limbah yang ditimbulkan tidak memberikan risiko yang besar. Jika kegiatan menggunakan radiasi namun tidak memberikan manfaat, maka kegiatan tersebut tidak diperbolehkan. Limitasi adalah upaya untuk membatasi penerimaan dosis bagi pekerja dan masyarakat dari dosis eksterna maupun interna dengan menerapkan Nilai Batas Dosis (NBD) yang telah ditetapkan oleh Badan Pengawas Radiasi (BAPETEN). Sedangkan Optimisasi diartikan bahwa paparan radiasi dari kegiatan dengan radiasi diusahakan serendah mungkin dengan menerapkan prinsip prinsip proteksi radiasi. Besarnya NBD yang ditetapkan untuk pekerja radiasi adalah 20 *mili sivert* (mSv) per tahun dosis efektif rata-rata selama lima tahun, sehingga dosis kumulatif selama lima tahun tidak melebihi 100 mSv. Dimungkinkan pekerja menerima dosis melebihi 20 mSv pada tahun tertentu, namun tidak melebihi 100 mSv dalam lima tahun. Besarnya NBD untuk masyarakat ditetapkan sebesar 1 mSv per tahun.[3]

Untuk mencapai tujuan persyaratan proteksi radiasi, maka dilakukan suatu pengendalian secara terus menerus dan berkelanjutan dengan menyusun program

proteksi dan keselamatan radiasi. Program ini harus dilaksanakan dan dievaluasi secara berkala untuk mengetahui jika terjadi anomali dari pelaksanaan dan hasil pemantauan yang dilakukan. Pengendalian radiasi dilakukan terhadap daerah kerja dan pada pekerjaannya secara periodik tergantung jenis pemantauannya. Pengendalian daerah kerja meliputi pemantauan daerah kerja terhadap kontaminasi udara maupun permukaan, dan pemantauan paparan radiasi atau laju dosis radiasi daerah kerja yang dilakukan secara rutin. Pengendalian keselamatan dan kesehatan pekerja radiasi meliputi pemantauan terhadap dosis radiasi eksternal dan internal.[4,5]

Penelitian hubungan perilaku keselamatan dan kesehatan kerja dengan dosis radiasi pada pekerja reaktor Kartini, menyimpulkan bahwa ada hubungan negatif yang signifikan antara perilaku K3 dengan dosis radiasi. Semakin baik perilaku K3 seseorang, semakin rendah dosis radiasi yang diterimanya, demikian pula sebaliknya. [6]

Proses pengolahan limbah meliputi preparasi, sementasi, kompaksi, kondisioning, penataan dan pemetaan limbah hasil proses maupun limbah sumber bekas. Dosis yang diterima pekerja dibandingkan dengan batasan yang diijinkan, laju dosis daerah kerja pada saat proses dan pemantauan rutin. Dosis radiasi yang diterima pekerja di kelompokkan sesuai dengan bidang pekerjaannya, untuk mengetahui adanya hubungan antara laju dosis daerah kerja dengan penerimaan dosis.

Makalah ini disampaikan dengan tujuan memberikan informasi keselamatan berdasarkan hasil evaluasi penerimaan dosis pekerja yang berhubungan langsung dengan bahan radioaktif pada saat proses pengolahan limbah radioaktif tahun 2015. Informasi ini juga dapat dimanfaatkan untuk pertimbangan dalam kegiatan dengan sumber radioaktif, bahwa keselamatan bekerja pada setiap tahap kegiatan perlu dilaksanakan dengan baik dan benar untuk mewujudkan keselamatan dan kesehatan pada pekerja dan masyarakat. Pemantauan harus dilakukan terus menerus dan selalu dilakukan evaluasi. Evaluasi ini dapat digunakan pula sebagai salah satu indikator pemenuhan dari tujuan keselamatan yang termuat dalam kebijakan keselamatan BATAN yaitu nihil kecelakaan.

METODOLOGI

Bahan yang digunakan dalam evaluasi ini adalah data sekunder hasil pengukuran laju dosis secara rutin selama tahun 2015, laju dosis pada saat proses pengolahan limbah dan dosis radiasi yang diterima pekerja yang menangani proses pengolahan limbah radioaktif tahun 2015.

Tahap tahap kegiatan proses dan pengukuran dilakukan sebagai berikut [7] :

1. Proses Preparasi

Limbah radioaktif dari penimbul yang berupa material terkontaminasi, sebelum dilakukan kompaksi ataupun insensersi dilakukan preparasi / penyortiran untuk memisahkan dan memastikan limbah sesuai dengan proses yang akan digunakan.

2. Proses Penataan

Proses penataan adalah kegiatan yang dilakukan untuk pemetaan dan mengelompokkan limbah yang belum diproses sesuai dengan perlakuan proses yang digunakan, juga pemetaan limbah radioaktif setelah proses agar mudah dalam pencarian apabila diperlukan.

3. Proses Kondisioning

Proses kondisioning di lakukan untuk limbah-limbah sumber bekas dengan dimensi kecil, limbah sumber bekas ini dikelompokkan sesuai dengan jenis radionuklidanya/ pemancar radiasinya dan di simpan ke dalam *hotcell* dengan volume 350 liter.

4. Proses Sementasi

Proses sementasi pada tahun 2015, untuk limbah konsentrat berupa resin bekas yang berasal dari pemurnian air kolam reaktor. Resin bekas yang terkontaminasi di lakukan proses sementasi dengan menambahkan pasir, semen dengan perbandingan berat 260 : 400 : 600 kg, di tambahkan air sedikit demi sedikit sambil

dilakukan pengadukan, proses dilakukan di dalam *hotcell*.

5. Proses Kompaksi

Proses kompaksi yaitu kegiatan yang dilakukan untuk mereduksi volume limbah material terkontaminasi, limbah yang telah di lakukan preparasi/ penyortiran dimasukkan dalam drum volume 100 liter. Limbah dalam drum 100 liter di kompaksi satu persatu kedalam drum 200 liter. Satu buah drum 200 liter dapat berisi 5-6 drum 100 liter terkompaksi.

6. Proses immobilisasi

Adalah proses yang dilakukan agar limbah tidak mudah bergerak jika ada benturan atau goncangan, immobilisasi dilakukan untuk limbah material terkontaminasi di dalam drum 200 liter, dengan menggunakan adonan semen dan dituangkan pada sekeliling antara drum 100 liter dengan drum 200 liter.

7. Pengukuran Laju dosis :

Laju dosis diukur dengan menggunakan alat *surveymeter* digital, hasil pengukuran di kurangi pengukuran latar dan dikonversikan dengan faktor kalibrasi yang masih berlaku. Laju dosis daerah kerja saat proses diukur sama seperti pengukuran laju dosis daerah kerja, namun pada daerah dimana pekerja melakukan pekerjaan dengan limbah radioaktif.

Perhitungan laju dosis menggunakan rumus :[8,9]

$$LD = (LD_1 - LD_0) \times Fk \dots\dots\dots(1)$$

- LD = Laju Dosis
- LD₁ = Laju Dosis terukur
- LD₀ = Laju Dosis latar
- Fk = Faktor Kalibrasi Alat ukur yang digunakan

Pengukuran laju dosis daerah kerja :

1. Disiapkan data sekunder hasil pemantauan laju dosis daerah kerja yang dilakukan setiap minggu selama tahun 2015.
2. Menentukan daerah kerja yang digunakan untuk kegiatan proses pengolahan limbah
3. Data di ambil pada titik pemantauan daerah kerja yang digunakan untuk masing masing proses yaitu pada 10 (sepuluh) titik pemantauan.
4. Menentukan data laju dosis kumulatif, tertinggi dan rerata pada masing-masing daerah kerja yang digunakan kegiatan proses.

1. Melakukan inventarisasi proses yang dilakukan selama tahun 2015
2. Memasukkan data laju dosis saat proses yang sesuai dengan daerah kerja yang digunakan untuk masing masing proses pengolahan limbah pada program *exell*.
3. Menentukan data laju dosis kumulatif, tertinggi dan rerata pada masing-masing daerah kerja yang digunakan kegiatan proses

Pengukuran dosis radiasi pekerja :

Pengukuran dosis radiasi eksternal yang diterima pekerja menggunakan alat *Thermoluminisence Dosimeter* (TLD) yang dilakukan evaluasi setiap tiga bulan untuk mengetahui dosis radiasi yang diterima pekerja. Evaluasi dilakukan oleh laboratorium yang terakreditasi atau ditunjuk oleh Badan Pengawas radiasi. Pemantauan dosis

radiasi pekerja secara internal dilakukan dengan pengukuran langsung pada tubuh pekerja menggunakan alat *Whole Body Counter* (WBC)

untuk mengetahui adanya kontaminasi zat radioaktif dalam tubuh.[8,9]

Perhitungan dosis radiasi :

$$D = D_{\text{eksternal}} + D_{\text{internal}} \text{ (mSv)} \dots \dots \dots (2)$$

D = Dosis radiasi yang diterima pekerja

Data pemantauan radiasi di analisis dan di evaluasi menggunakan program *excel* untuk memperoleh data kumulatif, rerata dan minimum/ maksimum.

Tahapan kegiatan pengolahan data :

1. Mengelompokkan pekerja sesuai dengan pekerjaan yang ditanganinya
2. Memasukkan data dosis masing-masing pekerja empat kali pemantauan pada tahun 2015
3. Menentukan dosis radiasi kumulatif pekerja selama tahun 2015
4. Menentukan dosis rerata yang diterima kelompok pekerja pada masing masing proses.
5. Membuat tabel kelompok kegiatan dengan laju dosis rutin dan saat proses
6. Membuat tabel dosis yang diterima pekerja pada masing-masing kegiatan

7. Membandingkan hasil perhitungan dosis radiasi pekerja dengan batasan yang di iijinkan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada tahun 2015 kegiatan proses pengolahan limbah meliputi, preparasi, penataan, kondisioning, sementasi, kompaksi dan immobilisasi. Hasil pengukuran laju dosis daerah kerja pada saat proses maupun pengukuran rutin mingguan setelah dilakukan pengolahan data diperoleh besaran laju dosis rerata untuk setiap kegiatan proses. Hasil pengukuran laju dosis pada berbagai proses di tampilkan pada Tabel 1 sebagai berikut ;

Tabel 1. Laju dosis rerata pada saat proses dan pemantauan rutin

No	proses	Kode Daerah kerja	Laju dosis (µSv/jam)	
			Proses	rutin
1	preparasi	3004	0,57	0,21
2	penataan	IS-1.C	2,62	1,10
3	kondisioning	IS-1.B	3,32	0,52
4	sementasi	3003	0,50	0,23
5	kompaksi	3002	0,37	0,18
6	immobilisasi	2021	0,35	0,18

Pengukuran laju dosis pada pengukuran rutin dilakukan pada titik pemantauan yang telah ditetapkan, yang dianggap dapat mewakili setiap sudut pada ruangan tersebut, sehingga bukan merupakan laju dosis terukur salah satu paket limbah. Pada saat proses pengukuran laju dosis dilakukan di daerah dimana kegiatan tersebut dilakukan dan tentu saja jarak dengan limbah yang akan diolah tidak jauh, sehingga memberikan kontribusi peningkatan laju dosis terukur. Pada kegiatan kondisioning, sumber limbah radioaktif di disiapkan di ruang koridor IS. Kegiatan kondisioning dilakukan di IS-1B yaitu ruang antara limbah sebelum diolah dan setelah diolah, sehingga laju dosis rerata pada proses kondisioning lebih besar dibandingkan dengan laju dosis rerata pada pengukuran rutin. Proses pengolahan limbah preparasi, sementasi,

kompaksi dan immobilisasi di lakukan di daerah pengendalian dengan batasan pengukuran yang ditetapkan sebesar 10 µSv/jam. Jika dibandingkan dengan batasan untuk daerah kerja, maka laju dosis pada saat proses maupun pemantauan rutin rerata maksimal sebesar 48 % dari batasan. Pengukuran laju dosis rutin pada ruang 3004, relatif kecil karena ruang tersebut jika tidak ada proses preparasi, maka tidak ada limbah radioaktif, sehingga hasil pengukuran rutin bisa dianggap hasil ukur latar. Hal demikian juga pada proses sementasi, kompaksi dan immobilisasi, jika tidak melakukan proses ruang tersebut tidak ada limbah radioaktif. Berbeda dengan ruang IS, meskipun tidak ada proses, hasil pengukuran rutin memberikan besaran lebih besar dari pada ruang lainnya, karena di IS telah tersimpan limbah radioaktif baik sebelum

maupun setelah proses yang memberikan kontribusi peningkatan hasil pengukuran laju dosis.

Setiap kegiatan proses dilakukan oleh 6 sampai 7 personil yang terdiri dari penanggung jawab kegiatan, operator proses, petugas sistem

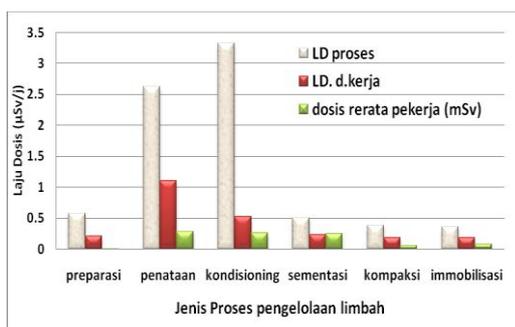
bantu, dan petugas keselamatan atau petugas proteksi radiasi. Hasil perhitungan rerata dosis radiasi kumulatif yang diterima pekerja, yang bertugas pada kegiatan proses pengolahan limbah selama tahun 2015, ditampilkan pada Tabel 2 sebagai berikut.

Tabel 2. Penerimaan dosis radiasi rerata pekerja pada berbagai proses

No	Proses	Jumlah personil	Penerimaan dosis rerata (mSv)
1	preparasi	6	0,01
2	penataan	6	0,28
3	kondisioning	7	0,26
4	Sementasi	7	0,25
5	Kompaksi	6	0,06
6	Immobilisasi	6	0,08

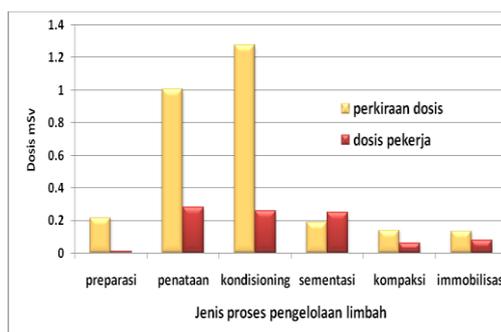
Dari Tabel 2 tersebut diatas, terlihat bahwa dosis tertinggi diterima pekerja pada proses penataan dan kondisioning, hal ini berkorelasi jika dibandingkan dengan data laju dosis pada Tabel 1 diatas. Laju dosis baik saat proses maupun pemantauan rutin tertinggi pada ruang IS, dimana kegiatan proses penataan dan kondisioning dilakukan di ruang tersebut. Dosis yang diterima pekerja adalah dosis kumulatif selama satu tahun, jika dibandingkan dengan NBD yang ditetapkan sebesar 20 mSv/tahun, maka dosis yang diterima pekerja masih sangat jauh dari batasan yaitu sekitar 1,4 % dari batasan. Penerimaan dosis terkecil pada pekerja yang melakukan kegiatan preparasi yaitu rerata sebesar 0,01 mSv selama satu tahun, hal ini karena beberapa hal upaya yang dilakukan untuk memenuhi syarat limitasi yaitu membatasi

penerimaan dosis dengan melakukan rekayasa. Rekayasa yang dilakukan untuk memperkecil penerimaan dosis yaitu kegiatan dilakukan di ruang *glovebox* sehingga mengurangi paparan radiasi karena adanya penahan radiasi pada *glovebox* tersebut. Pengerjaan di dalam *glovebox* juga mengurangi potensi bahaya radiasi interna yang dapat terhirup oleh pekerja. Demikian juga pada proses kompaksi, penerimaan dosis personil yang menanganinya kecil yaitu sebesar 0,06 mSv selama satu tahun, hal ini karena kegiatan kompaksi juga dilakukan di dalam ruang khusus, sehingga paparan radiasi pada saat kompaksi dilakukan tidak memberikan kontribusi penerimaan dosis personil yang signifikan. Sebagai gambaran perbandingan penerimaan dosis dengan pengukuran laju dosis ditampilkan pada Gambar 1 dan Gambar 2. sebagai berikut



Gambar 1. Kurva laju dosis saat proses, pemantauan rutin dan penerimaan dosis pekerja

Gambar 1. laju dosis saat proses relatif tinggi dibandingkan dengan laju dosis pemantauan rutin, karena saat proses berhubungan langsung dengan limbah radioaktif, sedangkan laju dosis rutin, tidak semua ruangan ada limbah radioaktif, limbah hanya ada di *interm storage* saja. Laju dosis diperhitungkan dengan satuan µSv/jam, sedangkan dosis yang diterima pekerja dengan



Gambar 2. Kurva perkiraan dosis dan penerimaan dosis pekerja

satuan mSv selama satu tahun. Gambar 2. menunjukkan kurva perkiraan penerimaan dosis berdasarkan pengukuran laju dosis selama proses, dengan waktu kerja berhubungan langsung dengan limbah radioaktif selama 384 jam dalam satu tahun, dibandingkan dengan penerimaan dosis yang sebenarnya dari pengukuran dosimeter perorangan. Sebagian

besar perkiraan dosis berdasarkan laju dosis lebih besar dibandingkan dengan penerimaan dosis sebenarnya, karena pekerja tidak berada tetap pada satu titik dengan sumber radiasi. Pada proses sementasi dosis rerata lebih tinggi dari perkiraan dosis dikarekan ada pekerja yang melakukan kegiatan lain diluar kegiatan proses yang dilakukan selama periode pemakaian dosimeter, sehingga penerimaan dosis selama kegiatan lain memberikan penambahan dosis yang diterima pada periode tertentu.

KESIMPULAN

Penerimaan dosis radiasi pekerja, tergantung pada kegiatan yang dilakukan yang berhubungan langsung dengan sumber radiasi yang ditanganinya. Semakin tinggi paparan radiasi limbah yang ditanganinya, maka semakin besar potensi penerimaan dosis radiasi. Penerimaan dosis tertinggi pada kegiatan penataan limbah sebesar 0,28 mSv, dengan laju dosis saat proses 2,62 μ Sv/jam. Penerimaan dosis ini masih jauh dari batasan tahunan yang diijinkan untuk pekerja yaitu 20 mSv. Penerimaan dosis tindak hanya tergantung pada besarnya paparan radiasi yang ditanganinya, namun juga tergantung pada jarak dengan sumber dan penahan atau alat pelindung diri yang digunakan. Penerimaan dosis radiasi dapat digunakan sebagai indikator keselamatan dalam pengolahan limbah radioaktif. Semakin kecil penerimaan dosis radiasi dan semakin rendah dari batasan yang ditentukan, maka semakin baik tingkat keselamatan dan kesehatan pekerja. Dengan melaksanakan persyaratan proteksi radiasi pada setiap tahapan kegiatan dengan sumber radiasi, maka keselamatan dan kesehatan kerja dapat berjalan dengan baik, sehingga keselamatan pekerja dan masyarakat pada umumnya juga akan baik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada seluruh staf Bidang Keselamatan Kerja dan Operasi, Bidang Pengolahan Limbah dan Bidang Pengembangan Fasilitas – PTLR. Ucapan

terima kasih juga disampaikan kepada Bidang Pemantauan Dosis Personil dan Pemantauan Lingkungan – Pusat Pendayagunaan Informatika Kawasan Strategik Nuklir (PDPPL – PPIKSN) yang telah membantu dalam evaluasi dosis personil.

DAFTAR PUSTAKA

1. Anonim, Undang Undang Negara RI Nomor 10 tahun 1997, tentang Ketenaganukliran, Lembaran Negara nomor 23 tahun 1997
2. Diseminasi dan Kemitraan, www.batan.go.id, diakses pada tanggal 12 Juli 2016.
3. Anonim, Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 4 tahun 2013, tentang Proteksi dan Keselamatan Radiasi Dalam Pemanfaatan Tenaga Nuklir.
4. ALAN MARTIN, SAMUEL A. HARBISON; An Introduction to Radiation Protection; second edition, Chapman and Hall, 1979.
5. Anonim, Program Proteksi dan Keselamatan Radiasi Instalasi Pengolahan Limbah Radioaktif, Bidang Keselamatan Kerja dan Operasi, PTLR., 2015
6. ZAINAL A, TRI WULAN T, ISHANDONO D. “Hubungan perilaku keselamatan dan kesehatan kerja dengan dosis radiasi pada pekerja reaktor Kartini”, Prosiding Seminar Nasional IV SDM Teknologi Nuklir, ISSN 1978-0176, Yogyakarta, 2008
7. Anonim, Peraturan Pemerintah Nomor 61 Tahun 2013, tentang pengelolaan Limbah Radioaktif, lembaran negara nomor 152 tahun 2013.
8. Anonim, *Standard Operation Procedure Administratif Pengendalian Daerah Kerja Bidang Keselamatan Kerja dan Operasi*, PTLR., , revisi 0, 2015.
9. Anonim, *Standard Operation Procedure*, Pemantauan Dosis Personil, Bidang Keselamatan Kerja dan Operasi, PTLR., 2015.

PENERAPAN NILAI BATAS LEPASAN RADIOAKTIVITAS KE BADAN AIR DI KAWASAN NUKLIR SERPONG

Arif Yuniarto, Aepah Nurbiyanti, Ambar Winansi, Ritayanti

Badan Tenaga Nuklir Nasional

Gedung 71 Kawasan PUSPIPTEK Serpong

E-mail: arif_y@batan.go.id

ABSTRAK

PENERAPAN NILAI BATAS LEPASAN RADIOAKTIVITAS KE BADAN AIR DI KAWASAN NUKLIR SERPONG. Fasilitas nuklir di Kawasan Nuklir Serpong (KNS) pada kondisi operasi normal (bukan kecelakaan) berpotensi melepaskan zat radioaktif ke badan air (akuatik). Oleh karena itu, pengendalian pelepasan efluen cair ke lingkungan dengan mempertimbangkan dampak radiologi yang dapat diterima oleh masyarakat perlu dilakukan. Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN) Nomor 7 Tahun 2013 Tentang Nilai Batas Radioaktivitas Lingkungan pada Pasal 6 menyatakan bahwa Pemegang Izin (PI) dari fasilitas harus menetapkan Nilai Batas Lepas Radioaktivitas ke Lingkungan untuk tujuan desain proteksi radiasi fasilitas. Nilai Batas Lepas Radioaktivitas ke Lingkungan harus disampaikan kepada Kepala BAPETEN yang menjadi bagian program proteksi dan keselamatan radiasi untuk pengajuan izin konstruksi, komisioning, dan operasi. Dalam rangka melaksanakan peraturan tersebut, KNS BATAN menyusun dokumen Kajian Nilai Batas Lepas Radioaktif ke Lingkungan Kawasan Nuklir Serpong dengan tujuan menetapkan nilai batas lepasan radioaktivitas ke lingkungan untuk seluruh instalasi di KNS yang memiliki potensi lepasan efluen radioaktif ke lingkungan dan telah disampaikan ke BAPETEN. Setelah tersusunnya dokumen tersebut, diperlukan suatu implementasi pelaksanaan dalam pengendalian lepasan radioaktif, dalam hal ini lepasan efluen cair ke badan air. Metode yang digunakan antara lain pengambilan sampel efluen cair pada kolam Pemantauan Buangan Terpadu (PBT), pengukuran konsentrasi aktivitas sampel efluen cair dengan spektrometer gamma, sertaperhitungan aktivitas total efluen cair dan verifikasi keberterimaannya terhadap nilai batas lepasan mingguan ke badan air KNS. Hasil verifikasi menunjukkan bahwa aktivitas total efluen cair KNS lebih kecil dari nilai batas lepasan mingguan. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa pelepasan efluen cair KNS tidak memberikan dampak radiasi yang signifikan bagi masyarakat di sekitar KNS.

Kata Kunci : nilai batas lepasan radioaktivitas, efluen cair, Kawasan Nuklir Serpong

ABSTRACT

IMPLEMENTATION OF RADIOACTIVITY DISCHARGE LIMITS TO WATER BODY IN SERPONG NUCLEAR AREA. Nuclear facility in Serpong Nuclear Area (KNS) under normal operating conditions (not an accident) has the potential to release radioactive substances into a water body (aquatic). Therefore, a control of the discharge of liquid effluent into the environment by considering the radiological consequences that can be accepted by public members needs to be performed. Nuclear Energy Regulatory Agency (BAPETEN) Chairman's Regulation Number 7 Year 2013 on Environmental Radioactivity Limit in Article 6 states that licenseeshould establish radioactivity discharge limits to the environment for the purpose of radiation protection design of the facilities. The discharge limits must be reported to the Chairman of BAPETEN as a part of radiation protection and safety program for submitting permits of construction, commissioning, and operation. In order to implement these regulations, KNS BATAN establish a document on Assessment of Environmental Radioactivity Discharge Limits for Serpong Nuclear Area for setting discharge limits into the environment for entire installations in KNS that have the potential releases of radioactive effluents into the environment and has been submitted to BAPETEN. After establishing the document, it needs an implementation on the control of radioactive releases, in this case liquid effluent into water bodies. Methods used include liquid effluent sampling on an Integrated Effluent Monitoring (PBT), measurement of activity concentration of liquid effluent samples using gamma spectrometers, as well as the calculation of the total activity of liquid effluents and verification of acceptability to weekly discharge limits into water bodies around KNS. The verification results show that the total activity of liquid effluent in KNS is less than the weekly discharge limits. It can be concluded that the liquid effluent discharge KNS does not give significant radiation impact for public members around KNS.

Keywords : radioactivity discharge limit, liquid effluent, Nuclear Serpong Area

PENDAHULUAN

Kawasan Nuklir Serpong (KNS) merupakan Pusat Penelitian Ilmu Pengetahuan dan Teknologi (PUSPIPTEK) Nuklir yang berlokasi di Kawasan PUSPIPTEK Serpong,

Kecamatan Setu, Kota Tangerang Selatan. Di dalam kawasan ini terdapat berbagai fasilitas penelitian dan pengembangan teknologi nuklir antara lain reaktor serbaguna, fasilitas produksi bahan bakar nuklir, fasilitas produksi radioisotop dan radiofarmaka, instalasi pengolah limbah

radioaktif serta fasilitas pendukung lainnya. Seluruh fasilitas tersebut merupakan fasilitas Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) yang merupakan Lembaga Pemerintah Non Kementerian yang didirikan berdasarkan Undang-Undang Nomor 10 Tahun 1997 Tentang Ketenaganukliran.[1]

Reaktor Serba Guna dan Laboratorium Penunjang (RSG-LP) di Kawasan Nuklir Serpong (KNS) telah dirancang, dibangun dan dioperasikan dengan memperhatikan faktor keselamatan baik untuk pekerja, masyarakat dan lingkungan. Namun demikian, tidak dapat dihindarkan sejumlah kecil zat radioaktif yang terlepas ke lingkungan. Selain lepasan ke udara (atmosferik), fasilitas nuklir pada kondisi operasi normal (bukan kecelakaan) juga berpotensi melepaskan zat radioaktif ke badan air (akuatik). Jika tidak diperhatikan, lepasan zat radioaktif ke badan air berpotensi memberikan penerimaan dosis radiasi kepada masyarakat di sekitar KNS. Terkait hal tersebut, diperlukan suatu pengendalian dan pengawasan pelepasan efluen cair ke lingkungan dengan mempertimbangkan dampak radiologi yang dapat diterima oleh masyarakat.[2]

Di dalam Keputusan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor SK.63/Menlhk/Setjen/ PKTL. 4/2/2016 tentang Perubahan Izin Lingkungan Kegiatan Operasional Kawasan Nuklir Serpong dan Irradiator serta Fasilitas Lainnya di Kawasan Nuklir Serpong (KNS) – BATAN, PUSPIPEK – Serpong, Kecamatan Setu, Kota Tangerang Selatan, Provinsi Banten, oleh Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) juga dinyatakan bahwa salah satu dampak lingkungan yang dikelola adalah peningkatan lepasan radioaktif ke badan air yang bersumber dari lepasan efluen radioaktif cair dari instalasi Pemantauan Buangan Terpadu (PBT). Indikator keberhasilan pengelolaan lingkungan hidup terkait dampak tersebut berupa aktivitas radionuklida tidak melebihi nilai batas lepasan radioaktivitas ke badan air sebagaimana diatur dalam Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN) Nomor 7 Tahun 2013 Tentang Nilai Batas Radioaktivitas Lingkungan.[3]

Berdasarkan Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN) Nomor 7 Tahun 2013 Tentang Nilai Batas Radioaktivitas Lingkungan pada Pasal 6 dinyatakan bahwa Pemegang Izin (PI) dari fasilitas harus menetapkan Nilai Batas Lepasannya Radioaktivitas ke Lingkungan untuk tujuan desain proteksi radiasi fasilitas [4]. Nilai Batas Lepasannya Radioaktivitas ke Lingkungan harus disampaikan kepada Kepala BAPETEN yang menjadi bagian program proteksi dan keselamatan radiasi untuk pengajuan izin konstruksi, komisioning, dan

operasi. Dalam hal pembatas dosis untuk anggota masyarakat, BAPETEN telah menetapkan nilai pembatas dosis maksimum untuk satu kawasan yang ditetapkan pada Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 4 Tahun 2013 Tentang Proteksi Dan Keselamatan Radiasi Dalam Pemanfaatan Tenaga Nuklir [5].

Dalam rangka melaksanakan peraturan tersebut, KNS BATAN menyusun dokumen Kajian Nilai Batas Lepasannya Radioaktif ke Lingkungan Kawasan Nuklir Serpong dengan tujuan menetapkan nilai batas lepasannya radioaktivitas ke lingkungan untuk seluruh instalasi di KNS yang memiliki potensi lepasannya efluen radioaktif ke lingkungan. Batas lepasannya ditetapkan untuk lepasannya ke udara dan ke badan air. Batas lepasannya tersebut merupakan panduan operasional tiap-tiap satuan kerja yang ada di KNS dalam mengelola dan mengendalikan lepasannya zat radioaktif ke lingkungan.

Setelah tersusunnya dokumen yang menetapkan batas lepasannya radioaktif tersebut, diperlukan suatu penerapan pelaksanaan dalam pengendalian dan pengawasan efluen radioaktif. Pada dasarnya, aktivitas total lepasannya per minggu harus diukur dan dihitung dengan metode yang representatif sehingga dapat dibandingkan dengan batas lepasannya per minggu yang diturunkan dari batas lepasannya tahunan. Ruang lingkup pembahasan kajian ini dibatasi pada pengendalian efluen cair yang berasal dari instalasi-instalasi di KNS. Pengendalian efluen radioaktif cair di KNS dilakukan oleh Sub Bidang Pemantauan Lingkungan dan Kedaruratan di bawah Pusat Pendeteksi dan Pengendalian Lingkungan dan Kawasan Strategis Nuklir (PPIKSN). Sebelum dilepas ke lingkungan, efluen radioaktif cair dari instalasi nuklir di KNS dialirkan dan ditampung di kolam PBT.

PBT bertujuan untuk mengawasi pembuangan tahap akhir efluen radioaktif cair oleh setiap instalasi nuklir yang berada di KNS sebelum dialirkan ke badan air kali Cisalak. Hal ini dilakukan sesuai dengan peraturan dan ketentuan yang ditetapkan oleh BATAN, BAPETEN dan Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. Fasilitas PBT adalah kolam penampungan efluen radioaktif cair sebelum dialirkan/dibuang ke lingkungan. Setiap instalasi yang akan membuang efluen radioaktif cair harus memiliki tempat penampungan sementara sebelum dikirim ke fasilitas PBT. Proses pemindahan efluen dari tiap instalasi menggunakan pompa isap tekan yang terdapat di masing-masing instalasi, kemudian melalui pipa saluran dialirkan secara gravitasi ke kolam penampungan PBT.

Dalam penentuan batas lepasannya, suku sumber lepasannya akuatik (ke badan air) ditentukan berdasarkan data lepasannya instalasi melalui

Pemantauan Buangan Terpadu (PBT) KNS periode 2009 s.d 2013. Untuk pendekatan konservatif, digunakan data lepasan maksimum tahunan, yaitu lepasan tahun 2012. Radionuklida dominan yang sering dilepas adalah Zn-65, Co-60 dan Na-24 yang berasal dari efluen cair Reaktor Serba Guna. Selain itu, radionuklida lain yang perlu diantisipasi adalah Cs-137 dari kegiatan laboratorium dan pengolahan limbah di KNS. Dalam hal ini, radionuklida potensial dari IRR terkait Izin Operasi Untuk Produksi Radioisotop Tahun 2014 perlu ditentukan batas lepasan akuatiknya melalui pendekatan faktor perhitungan dosis sebagai bentuk antisipasi. Dalam kajian lepasan akuatik KNS, jalur paparan radiasi yang dipertimbangkan antara lain paparan eksternal dari sedimen sungai dan paparan internal dari injeksi produk perikanan. Perhitungan nilai penerimaan dosis pada kelompok kritis menggunakan skenario sebagaimana kondisi spesifik tapak. Kelompok kritis diasumsikan menerima dosis tahunan dari jalur paparan injeksi (ikan) serta dari pemancingan berupa paparan radiasi eksternal. Selanjutnya, dilakukan perhitungan dosis individual yang diterima dalam skenario yang mewakili kelompok kritis tersebut. Berdasarkan dosis individual, data lepasan dan pembatas dosis, dapat dihitung batas lepasan akuatik instalasi KNS.

Beberapa ketentuan terkait pengaliran efluen cair dari instalasi ke kolam PBT, antara lain:

- Setiap instalasi tidak boleh melewati batas lepasan turunan per minggu, seperti ditunjukkan pada Tabel 1.
- Instalasi yang memiliki saluran ke kolam Pemantauan Buangan Terpadu (PBT) dapat melakukan pengaliran efluen cair melalui koordinasi dengan PPIKSN selaku koordinator pemantauan lingkungan kawasan sesuai prosedur.
- Setiap instalasi harus melakukan pengukuran konsentrasi aktivitas lepasan efluen cair dalam satuan Bq/volume dan total volume efluen cair yang dikirim ke tempat penampungan PBT dan melaporkan lepasan tersebut ke PPIKSN untuk setiap kali pengaliran.

Ketentuan tersebut bertujuan untuk memastikan bahwa efluen radioaktif cair yang dialirkan ke kolam PBT merupakan efluen yang memenuhi syarat dari aspek radioaktivitas dapat dilepas ke badan air. Selanjutnya, PPIKSN melakukan pengambilan sampel pada kolam PBT, melakukan analisis pengukuran kandungan zat radioaktif menggunakan spektrometer gamma, melakukan perhitungan aktivitas total dan membandingkan aktivitas total tersebut dengan batas lepasan sebagai bentuk verifikasi akhir sebelum efluen radioaktif cair dilepas ke badan air.

Tabel 1. Nilai Batas Lepasn Radioaktivitas ke Badan Air KNS

Nuklida	Batas Lepasn (Bq/tahun)	Batas Lepasn Turunan (Bq/minggu)	Nuklida	Batas Lepasn (Bq/tahun)	Batas Lepasn Turunan (Bq/minggu)
Au-198	$3,94 \times 10^{11}$	$7,57 \times 10^9$	Na-24	$1,08 \times 10^{12}$	$2,09 \times 10^{10}$
Br-82	$4,41 \times 10^{10}$	$8,47 \times 10^8$	P-32	$3,83 \times 10^9$	$7,37 \times 10^7$
Co-58	$2,92 \times 10^{10}$	$5,62 \times 10^8$	Pd-103	$1,75 \times 10^{12}$	$3,37 \times 10^{10}$
Co-60	$1,14 \times 10^{10}$	$2,19 \times 10^8$	Re-186	$2,13 \times 10^{12}$	$4,10 \times 10^{10}$
Cs-137	$3,94 \times 10^{10}$	$7,57 \times 10^8$	Re-188	$1,49 \times 10^{12}$	$2,87 \times 10^{10}$
Cu-64	$2,13 \times 10^{11}$	$4,09 \times 10^9$	Sm-153	$5,26 \times 10^{11}$	$1,01 \times 10^{10}$
F-18	$1,18 \times 10^{11}$	$2,27 \times 10^9$	Sr-90	$7,81 \times 10^{11}$	$1,50 \times 10^{10}$
Fe-59	$2,43 \times 10^{10}$	$4,68 \times 10^8$	Tc-99m	$2,14 \times 10^{13}$	$4,12 \times 10^{11}$
Gd-153	$2,84 \times 10^{11}$	$5,46 \times 10^9$	U-235	$7,46 \times 10^{11}$	$1,44 \times 10^{10}$
Hg-203	$1,78 \times 10^{11}$	$3,42 \times 10^9$	U-238	$9,80 \times 10^{11}$	$1,89 \times 10^{10}$
I-125	$7,04 \times 10^{11}$	$1,35 \times 10^{10}$	W-188	$5,49 \times 10^{12}$	$1,06 \times 10^{11}$
I-131	$2,09 \times 10^{11}$	$4,02 \times 10^9$	Y-90	$2,70 \times 10^{13}$	$5,20 \times 10^{11}$
Ir-192	$3,51 \times 10^{10}$	$6,75 \times 10^8$	Yb-169	$9,71 \times 10^{10}$	$1,87 \times 10^9$
Lu-177	$9,52 \times 10^{11}$	$1,83 \times 10^{10}$	Zn-65	$6,55 \times 10^{10}$	$1,26 \times 10^9$
Mo-99	$3,61 \times 10^{11}$	$6,94 \times 10^9$			

Makalah ini bertujuan untuk memberikan *good practice* dalam pemantauan batas lepasan efluen radioaktif cair yang berasal dari beberapa fasilitas nuklir di dalam suatu kawasan secara terpusat. Metode yang digunakan dalam makalah ini bukan satu-satunya metode pendekatan dalam

pemantauan lepasan efluen radioaktif cair. Metode tersebut dapat dievaluasi dan dikembangkan dengan mempertimbangkan berbagai faktor, seperti kondisi kawasan, peralatan yang tersedia, serta peraturan yang berlaku.

METODOLOGI

Bahan yang digunakan berupa sampel efluen cair yang dilepas ke badan air KNS melalui kolam PBT mulai Januari sampai dengan Juni 2016 sebagai periode awal penerapan nilai batas lepasan radioaktivitas di KNS.

Alat yang digunakan antara lain pengambil sampel efluen cair, wadah sampel dan perangkat spektrometer gamma.

Metode yang digunakan antara lain:

- Pengambilan sampel efluen cair pada kolam PBT

Pengambilan sampel efluen cair pada kolam PBT dilakukan sama seperti SOP Pengambilan sampel air lingkungan dimana prosedur/SOP tersebut dapat juga digunakan untuk penerapan pada pengambilan sampel efluen cair pada kolam PBT[6]. SOP ini berlaku sebagai pedoman dalam pengambilan sampel air lingkungan di daerah pemantauan radioaktivitas lingkungan Kawasan Nuklir Serpong. Jadi pengambilan sampel adalah cara atau prosedur dalam memperoleh bagian yang representatif dari bahan tertentu atau contoh lingkungan. Adapun tahapan-tahapan yang harus disiapkan dalam pengambilan sampel efluen cair pada kolam PBT adalah :

1. Menyiapkan peralatan pengambilan sampel air (*water sampler*),
2. Menyiapkan wadah sampel air (jirigen) ukuran 2 liter,
3. Melabeli wadah sampel air dengan kode sampel yang akan diambil,
4. Melakukan pengadukan efluen cair pada kolam PBT sebelum diambil sampelnya,
5. Melakukan pengambilan sampel dengan alat pengambil sampel air dan memasukkannya ke dalam wadah sampel air,
6. Menyerahkan sampel kepada petugas analisis untuk dilakukan pengukuran menggunakan spektrometer gamma.

- Pengukuran konsentrasi aktivitas sampel efluen cair dengan spektrometer gamma

Metode pengukuran konsentrasi aktivitas sampel efluen cair mengacu pada SOP Pengoperasian dan Perawatan Spektrometer Gamma [7] serta SOP Analisis Spektrometer Gamma [8]. Ada beberapa tahap dalam pengukuran konsentrasi aktivitas sampel efluen cair setelah dilakukan pengambilan sampel dari kolam PBT, yaitu ;

1. Preparasi sampelefluen
Pada proses preparasi, sampel efluen cair yang berasal dari kolam PBT

diperlakukan sama dengan sampel air lingkungan. Sampel dituang ke dalam botol sampel khusus, yang telah dibilas terlebih dahulu dengan aquades. Volume sampel untuk pencacahan yaitu 500 ml sesuai dengan volume sumber standar yang digunakan untuk kalibrasi.

2. Persiapan kondisi operasi
Sebelum melakukan pengoperasian peralatan, terlebih dahulu dilakukan pengkondisian ruangan dan peralatan sebagai berikut :

- a. Kondisi ruangan dengan rentang suhu 20 – 24°C
- b. Berat dewar detektor minimal 17 kg untuk MCA-1 dan 10 kg untuk MCA-2
- c. Dewar detektor telah terisi nitrogen cair, minimal 7 jam sebelum operasi

3. Pengoperasian spektrometer gamma
Pengukuran konsentrasi aktivitas dilakukan dengan menggunakan spektrometer gamma jenis *high purity germanium* (HPGe) yang memiliki efisiensi relatif 10% (MCA 1) dan 20% (MCA 2). Pengoperasian dilakukan dengan tahapan kerja sebagai berikut :

- a. Memastikan bahwa spektrometer gamma telah dikalibrasi, baik kalibrasi efisiensi maupun kalibrasi energi. Hal ini disebabkan metode spektrometer gamma merupakan metode pengukuran relatif, sehingga diperlukan kalibrasi untuk identifikasi jenis nuklida dan pengukuran radioaktivitasnya.
- b. Mengatur posisi HV pada kanal 3,3 kV untuk MCA-1 dan 2,2 kV untuk MCA-2.
- c. Memastikan posisi amplifier dan pre-amplifier sesuai dengan kondisi saat komisioning.
- d. Pencacahan dilakukan selama 8 jam.
- e. Setelah dilakukan pencacahan, kemudian dilakukan analisis menggunakan bantuan perangkat lunak *Genie2000*.

- Perhitungan aktivitas total efluen cair

Dari hasil analisis sampel menggunakan spektrometer gamma, dapat diidentifikasi jenis radionuklida dan konsentrasi aktivitas dari efluen radioaktif cair. Untuk memperoleh aktivitas total efluen, konsentrasi aktivitas tiap radionuklida dikalikan dengan volume efluen yang akan dilepaskan lingkungan.

Rumus perhitungan aktivitas total tiap radionuklida dalam efluen sebagai berikut:

$$A_i = C_i \times V \dots\dots\dots (1)$$

di mana:

A_i : Aktivitas total radionuklida i

C_i : Konsentrasi aktivitas radionuklida i (Bq/L)

V : Volume efluen yang dialirkan

Pada umumnya, proses laboratorium maupun pengolahan limbah di KNS akan menghasilkan beberapa jenis radionuklida yang kemudian dilepas oleh instalasi melalui

kolam PBT. Sehingga untuk lepasan lebih dari satu radionuklida, berlaku rumus rasio penjumlahan sebagai berikut :

Rumus rasio penjumlahan :

$$\sum_i^n \frac{A_i}{NBRL_i} \leq 1 \quad \dots\dots\dots (2)$$

di mana:

A_i : Lepasn radionuklida ke lingkungan radionuklida i hingga n

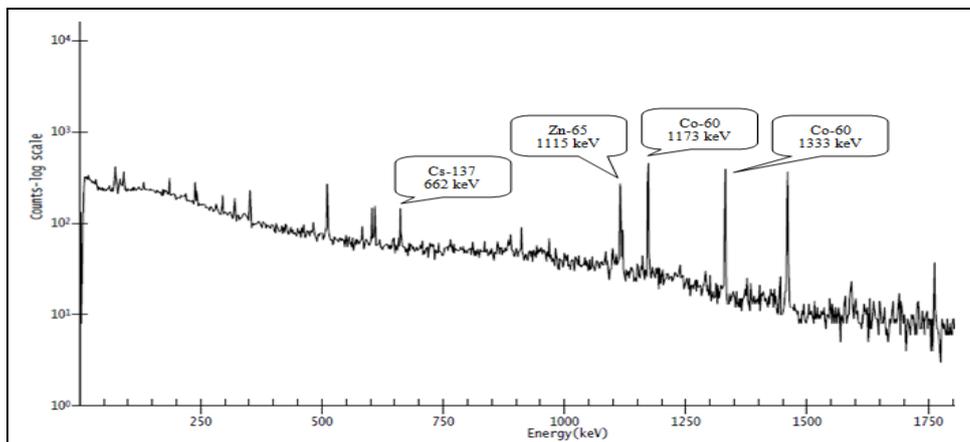
$NBRL_i$: Nilai batas radioaktivitas lingkungan radionuklida i hingga n

• Verifikasi keberterimaan terhadap nilai batas lepasan mingguan ke badan air KNS

Dengan rumus di atas, dapat diketahui nilai aktivitas total radionuklida yang selanjutnya akan dibandingkan dengan data pembanding yaitu Nilai Batas Lepasn Radioaktivitas ke Lingkungan KNS. Data pembanding tersebut berfungsi sebagai kontrol, dimana nilai aktivitas total radionuklida yang dilepas per minggu tidak boleh melebihi batas lepasn turunan per minggu. Dengan adanya kontrol tersebut, setiap instalasi memiliki nilai batas tertentu untuk dapat melepas radonuklida ke lingkungan melalui badan air.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Secara umum, kandungan lepasn efluen radioaktif cair KNS terdiri dari tiga radionuklida, yaitu Co-60, Zn-65 dan Cs-137. Kandungan radionuklida tersebut diidentifikasi menggunakan spektrometer gamma. Radionuklida Co-60 diidentifikasi pada energi 1173 dan 1333 keV, Zn-65 pada 1115 keV, sedangkan Cs-137 pada 662 keV. Co-60 dan Zn-65 merupakan produk aktivasi, sedangkan Cs-137 merupakan produk fisi.



Gambar 1. Tipe Spektrum Sampel Efluen Cair dari Kolam PBT

Gambar 1 menunjukkan tipe spektrum yang sering ditemukan pada analisis sampel efluen radioaktif cair dari kolam PBT. Selain jenis radionuklida, dari spektrum tersebut juga dapat dianalisis konsentrasi aktivitas tiap radionuklida yang terkandung dalam sampel. Jenis radionuklida dan konsentrasi aktivitas merupakan parameter penting dalam mengestimasi

kelayakan pelepasn efluen radioaktif cair ke badan air.

Berdasarkan kegiatan penerapan nilai batas lepasn radioaktivitas ke badan air di KNS selama semester I (Januari – Juni) tahun 2016, dapat disusun suatu tabel yang menggambarkan tanggal pelepasn, volume, radionuklida, konsentrasi aktivitas dan aktivitas total efluen yang dilepas dalam setiap minggu kalender,

seperti ditunjukkan pada Tabel 2. Aktivitas total efluen dihitung dengan mengkalikan antara konsentrasi aktivitas per radionuklida dan volume efluen cair menggunakan persamaan (1). Pelepasan per minggu merupakan penjumlahan dari pelepasan per batch pada minggu yang sama. Selanjutnya, aktivitas total efluen yang dilepas dalam setiap minggu selanjutnya dibandingkan

dengan nilai batas lepasan mingguan. Selama semester I tahun 2016, aktivitas total lepasan per minggu untuk tiap radionuklida lebih kecil dari batas lepasan mingguan. Hal tersebut menunjukkan bahwa lepasan efluen radioaktif cair KNS berada pada tingkat keselamatan yang diizinkan.

Tabel 2. Pelepasan Efluen Radioaktif Cair KNS Semester I Tahun 2016

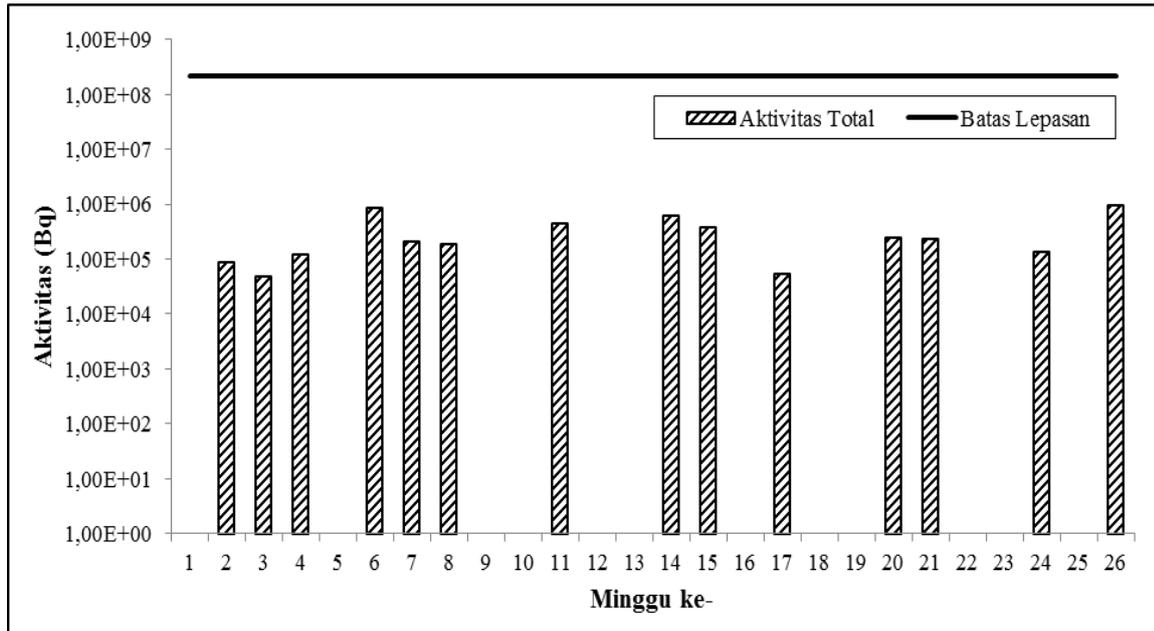
Minggu ke- (tanggal)	Tanggal Pelepasan	Volume (m ³)	Pelepasan Per Batch			Pelepasan Per Minggu		Batas Lepas an per Ming gu (Bq)
			Radionukli da	Konsentra si Aktivitas (Bq/L)	Aktivita s Total (Bq)	Radionukli da	Aktivita s Total (Bq)	
1 (04/01/2016 – 10/01/2016)	Tidak ada pelepasan							
2 (11/01/2016 – 17/01/2016)	15/1/2016	15	Co-60	5,95	8,93 x 10 ⁴	Co-60	8,93 x 10 ⁴	2,19 x 10 ⁸
			Zn-65	9,18	1,38 x 10 ⁵	Zn-65	1,38 x 10 ⁵	1,26 x 10 ⁹
			Cs-137	7,92	1,19 x 10 ⁵	Cs-137	1,19 x 10 ⁵	7,57 x 10 ⁸
3 (18/01/2016 – 24/01/2016)	18/1/2016	14	Co-60	3,52	4,93 x 10 ⁴	Co-60	4,93 x 10 ⁴	2,19 x 10 ⁸
			Cs-137	1,41	1,97 x 10 ⁴	Cs-137	1,97 x 10 ⁴	7,57 x 10 ⁸
4 (25/01/2016 – 31/01/2016)	27/1/2016	20	Co-60	6,20	1,24 x 10 ⁵	Co-60	1,24 x 10 ⁵	2,19 x 10 ⁸
			Zn-65	7,29	1,46 x 10 ⁵	Zn-65	1,46 x 10 ⁵	1,26 x 10 ⁹
			Cs-137	1,43	2,86 x 10 ⁴	Cs-137	2,86 x 10 ⁴	7,57 x 10 ⁸
5 (01/02/2016 – 07/02/2016)	Tidak ada pelepasan							
6 (08/02/2016 – 14/02/2016)	10/2/2016	40	Co-60	15,23	6,09 x 10 ⁵	Co-60	8,79 x 10 ⁵	2,19 x 10 ⁸
			Zn-65	28,48	1,14 x 10 ⁶			
			Cs-137	14,22	5,69 x 10 ⁵			
	12/2/2016	35	Co-60	7,71	2,70 x 10 ⁵	Zn-65	1,66 x 10 ⁶	1,26 x 10 ⁹
			Zn-65	15,00	5,25 x 10 ⁵	Cs-137	8,64 x 10 ⁵	7,57 x 10 ⁸
			Cs-137	8,44	2,95 x 10 ⁵			
7 (15/02/2016 – 21/02/2016)	18/2/2016	20	Co-60	10,81	2,16 x 10 ⁵	Co-60	2,16 x 10 ⁵	2,19 x 10 ⁸
			Zn-65	17,71	3,54 x 10 ⁵	Zn-65	3,54 x 10 ⁵	1,26 x 10 ⁹
			Cs-137	2,78	5,56 x 10 ⁴	Cs-137	5,56 x 10 ⁴	7,57 x 10 ⁸

Minggu ke- (tanggal)	Tanggal Pelepasan	Volume (m ³)	Pelepasan Per Batch			Pelepasan Per Minggu		Batas Lepasan per Minggu (Bq)
			Radionuklida	Konsentrasi Aktivitas (Bq/L)	Aktivitas Total (Bq)	Radionuklida	Aktivitas Total (Bq)	
					10 ⁴		10 ⁴	10 ⁸
8 (22/02/2016 – 28/02/2016)	23/02/2016 6	15	Co-60	12,87	1,93 x 10 ⁵	Co-60	1,93 x 10 ⁵	2,19 x 10 ⁸
			Zn-65	26,33	3,95 x 10 ⁵	Zn-65	3,95 x 10 ⁵	1,26 x 10 ⁹
			Cs-137	5,49	8,24 x 10 ⁴	Cs-137	8,24 x 10 ⁴	7,57 x 10 ⁸
9 (29/02/2016 – 06/03/2016)	Tidak ada pelepasan							
10 (07/03/2016 – 13/03/2016)	Tidak ada pelepasan							
11 (14/03/2016 – 20/03/2016)	16/3/2016	40	Co-60	11,05	4,42 x 10 ⁵	Co-60	4,42 x 10 ⁵	2,19 x 10 ⁸
			Zn-65	11,99	4,80 x 10 ⁵	Zn-65	4,80 x 10 ⁵	1,26 x 10 ⁹
			Cs-137	3,26	1,30 x 10 ⁵	Cs-137	1,30 x 10 ⁵	7,57 x 10 ⁸
12 (21/03/2016 – 27/03/2016)	Tidak ada pelepasan							
13 (28/03/2016 – 03/04/2016)	Tidak ada pelepasan							
14 (04/04/2016 – 10/04/2016)	6/4/2016	40	Co-60	15,56	6,22 x 10 ⁵	Co-60	6,22 x 10 ⁵	2,19 x 10 ⁸
			Zn-65	8,40	3,36 x 10 ⁵	Zn-65	3,36 x 10 ⁵	1,26 x 10 ⁹
			Cs-137	2,08	8,32 x 10 ⁴	Cs-137	8,32 x 10 ⁴	7,57 x 10 ⁸
15 (11/04/2016 – 17/04/2016)	12/4/2016	40	Co-60	9,82	3,93 x 10 ⁵	Co-60	3,93 x 10 ⁵	2,19 x 10 ⁸
			Zn-65	22,46	8,98 x 10 ⁵	Zn-65	8,98 x 10 ⁵	1,26 x 10 ⁹
			Cs-137	1,90	7,60 x 10 ⁴	Cs-137	7,60 x 10 ⁴	7,57 x 10 ⁸
16 (18/04/2016 – 24/04/2016)	Tidak ada Pelepasan							
17 (25/04/2016 – 01/05/2016)	29/4/2016	50	Co-60	5,58	5,52 x 10 ⁴	Co-60	5,52 x 10 ⁴	2,19 x 10 ⁸
			Zn-65	3,25	6,50 x 10 ⁴	Zn-65	6,50 x 10 ⁴	1,26 x 10 ⁹
18 (02/05/2016 – 08/05/2016)	Tidak ada Pelepasan							

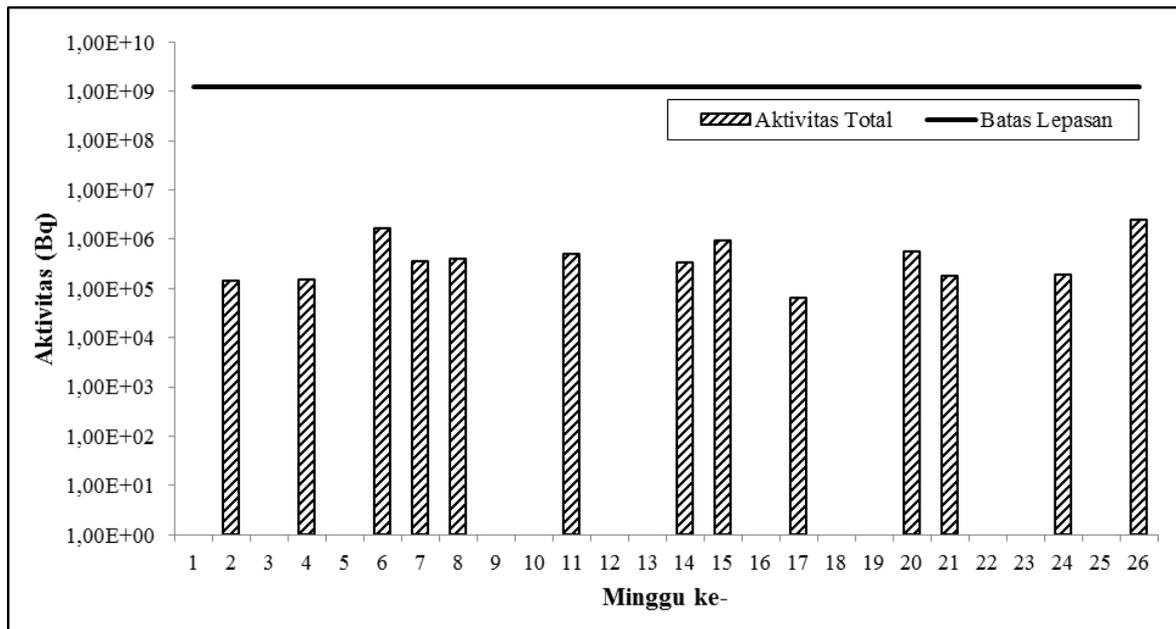
Minggu ke- (tanggal)	Tanggal Pelepasan	Volume (m ³)	Pelepasan Per Batch			Pelepasan Per Minggu		Batas Lepas an per Minggu (Bq)
			Radionuklida	Konsentrasi Aktivitas (Bq/L)	Aktivitas Total (Bq)	Radionuklida	Aktivitas Total (Bq)	
19 09/05/2016 – 15/05/2016)	Tidak ada Pelepasan							
20 16/05/2016 – 22/05/2016)	17/5/2016	40	Co-60	6,17	2,47 x 10 ⁵	Co-60	2,47 x 10 ⁵	2,19 x 10 ⁸
			Zn-65	13,84	5,54 x 10 ⁵	Zn-65	5,54 x 10 ⁵	1,26 x 10 ⁹
21 23/05/2016 – 29/05/2016)	24/5/2016	30	Co-60	7,83	2,35 x 10 ⁵	Co-60	2,35 x 10 ⁵	2,19 x 10 ⁸
			Zn-65	6,03	1,81 x 10 ⁵	Zn-65	1,81 x 10 ⁵	1,26 x 10 ⁹
			Cs-137	24,40	7,32 x 10 ⁵	Cs-137	7,32 x 10 ⁵	7,57 x 10 ⁸
22 30/05/2016 – 05/06/2016)	Tidak ada pelepasan							
23 06/06/2016 – 12/06/2016)	Tidak ada pelepasan							
24 13/06/2016 – 19/06/2016)	15/6/2016	42,5	Co-60	3,44	1,38 x 10 ⁵	Co-60	1,38 x 10 ⁵	2,19 x 10 ⁸
			Zn-65	4,28	1,82 x 10 ⁵	Zn-65	1,82 x 10 ⁵	1,26 x 10 ⁹
			Cs-137	3,14	1,33 x 10 ⁵	Cs-137	1,33 x 10 ⁵	7,57 x 10 ⁸
25 20/06/2016 – 26/06/2016)	Tidak ada pelepasan							
26 27/06/2016 – 03/07/2016)	28/6/2016	40	Co-60	22,84	9,14 x 10 ⁵	Co-60	9,69 x 10 ⁵	2,19 x 10 ⁸
			Zn-65	24,68	9,87 x 10 ⁵			
			Cs-137	2,88	1,15 x 10 ⁵			
	30/6/2016	20	Co-60	2,76	5,52 x 10 ⁴	Zn-65	2,37 x 10 ⁶	1,26 x 10 ⁹
Zn-65	69,36	1,39 x 10 ⁶	Cs-137	1,15 x 10 ⁵	7,57 x 10 ⁸			

Tiap radionuklida yang dilepas ke badan air perlu dievaluasi signifikansinya terhadap batas lepasan. Gambar 2, Gambar 3 dan Gambar 4 menunjukkan signifikansi aktivitas total lepasan per minggu dari Co-60, Zn-65 dan Cs-137 terhadap batas lepasan. Untuk Co-60, aktivitas total maksimum pelepasan per minggu terjadi pada minggu ke-26 sebesar 9,69 x 10⁵ Bq atau 0,44% dari batas lepasan. Aktivitas total rata-rata pelepasan per minggu Co-60 selama semester I tahun 2016 sebesar 1,79 x 10⁵ Bq atau

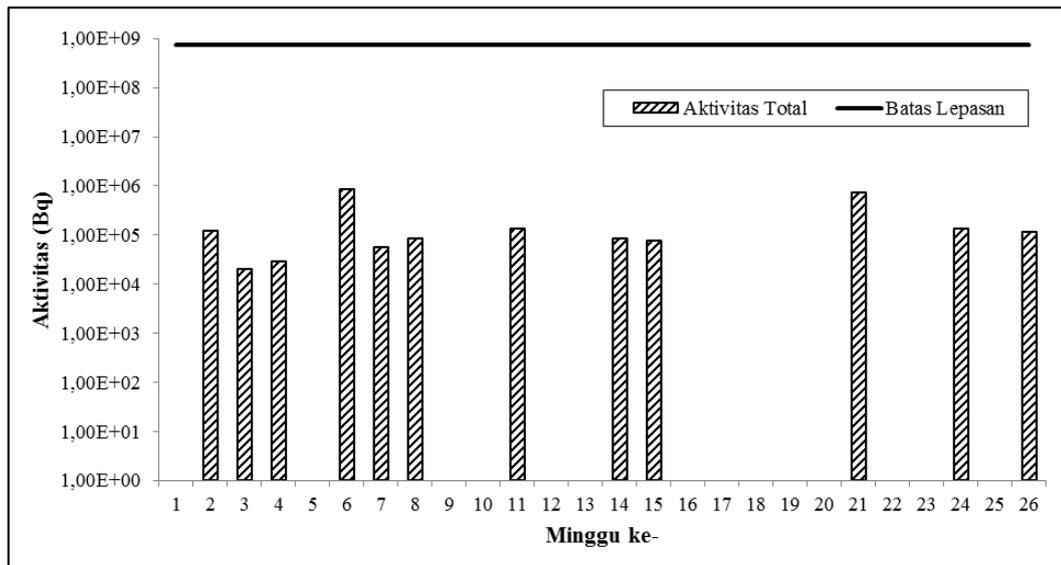
0,08% dari batas lepasan. Aktivitas total maksimum pelepasan per minggu dari Zn-65 juga terjadi pada minggu ke-26 sebesar 2,37 x 10⁶ Bq atau 0,19% dari batas lepasan, sedangkan aktivitas total rata-ratanya sebesar 2,98 x 10⁵ Bq atau 0,02% dari batas lepasan. Aktivitas total maksimum pelepasan per minggu dari Cs-137 terjadi pada minggu ke-6 sebesar 8,64 x 10⁵ Bq atau 0,11% dari batas lepasan, sedangkan aktivitas total rata-ratanya sebesar 9,38 x 10⁴ Bq atau 0,01% dari batas lepasan.



Gambar 2. Perbandingan antara Aktivitas Total dan Batas Lepas untuk Co-60



Gambar 3. Perbandingan antara Aktivitas Total dan Batas Lepas untuk Zn-65



Gambar 4. Perbandingan antara Aktivitas Total dan Batas Lepas untuk Cs-137

Dengan kecilnya rasio aktivitas total pelepasan terhadap batas lepasan per minggu untuk tiap radionuklida, dapat dipastikan bahwa batas lepasan tahunan pada Tabel 1 juga tidak akan terlewati. Adapun batas lepasan tahunan untuk Co-60, Zn-65 dan Cs-137 berturut-turut sebesar $1,14 \times 10^{10}$ Bq; $6,55 \times 10^{10}$ dan $3,94 \times 10^{10}$ Bq. Hal ini dapat dikonfirmasi dengan menjumlahkan aktivitas total selama semester I untuk setiap radionuklida. Aktivitas total pelepasan semester I untuk Co-60, Zn-65 dan Cs-137 berturut-turut sebesar $4,65 \times 10^6$ Bq; $7,76 \times 10^6$ Bq dan $2,44 \times 10^6$ Bq. Dengan kata lain, perbandingan antara aktivitas total selama semester I dan kuota batas lepasan tahunan yang

diizinkan untuk Co-60, Zn-65 dan Cs-137 berturut-turut sebesar 0,04%; 0,01% dan 0,01%.

Kecilnya rasio antara aktivitas total dan batas lepasan per radionuklida juga dapat dijadikan perkiraan awal bahwa rasio penjumlahan pada persamaan (2) untuk radionuklida campuran tidak akan melebihi nilai 1. Dalam hal memastikan hal tersebut, dibuat suatu tabel rasio penjumlahan per minggu untuk memverifikasi keberterimaan persamaan (2), seperti ditunjukkan pada Tabel 3. Jumlah rasio radionuklida campuran maksimum selama semester I terjadi pada minggu ke-6 sebesar 0,00647.

Tabel 3. Rasio Penjumlahan untuk Radionuklida Campuran

Minggu ke-	Rasio Penjumlahan	Minggu ke-	Rasio Penjumlahan
1	0,00000	14	0,00322
2	0,00067	15	0,00261
3	0,00025	16	0,00000
4	0,00072	17	0,00030
5	0,00000	18	0,00000
6	0,00647	19	0,00000
7	0,00134	20	0,00157
8	0,00130	21	0,00218
9	0,00000	22	0,00000
10	0,00000	23	0,00000
11	0,00257	24	0,00095
12	0,00000	25	0,00000
13	0,00000	26	0,00646

KESIMPULAN

Penerapan nilai batas lepasan radioaktivitas di KNS memerlukan beberapa tahapan penting, yaitu pengambilan sampel efluen pada kolam PBT, pengukuran konsentrasi aktivitas, estimasi aktivitas total dan perbandingan dengan batas lepasan spesifik tapak. Efluen radioaktif cair di KNS selama semester I tahun 2016 mengandung tiga radionuklida, yaitu Co-60, Zn-65 dan Cs-137. Aktivitas total pelepasan efluen per minggu tidak signifikan dibandingkan dengan batas lepasan, di mana perbandingannya tidak lebih dari 0,44%. Hal tersebut menunjukkan bahwa lepasan efluen radioaktif cair KNS berada pada tingkat keselamatan yang diizinkan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada seluruh satuan kerja penghasil efluen radioaktif cair atas kerja samanya yang baik dalam pengaliran efluen ke kolam PBT, serta kepada seluruh staf Subbidang Pemantauan Lingkungan dan Kedaruratan, Bidang Pemantauan Dosis Personel dan Lingkungan, PPIKSN, BATAN yang telah membantu dalam pengendalian dan pengawasan efluen radioaktif cair melalui sistem PBT.

DAFTAR PUSTAKA

1. Badan Tenaga Nuklir Nasional, "Dokumen Teknis Paket Teknologi Sistem Pemantauan Kontinyu Radiasi Udara Ambien Reaktor dan Fasilitas Nuklir," 2015.
2. Badan Tenaga Nuklir Nasional, "Dokumen Kajian Nilai Batas Lepasn Radioaktif ke Lingkungan Kawasan Nuklir Serpong," 2015.
3. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, "Keputusan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor SK.63/Menlhk/Setjen/PKTL.4/2/2016 tentang Perubahan Izin Lingkungan Kegiatan Operasional Kawasan Nuklir Serpong dan Irradiator serta Fasilitas Lainnya di Kawasan Nuklir Serpong".
4. Badan Pengawas Tenaga Nuklir, "Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 7 Tahun 2013 Tentang Nilai Batas Radioaktivitas Lingkungan".
5. Badan Pengawas Tenaga Nuklir, "Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013 Tentang Proteksi dan Keselamatan Radiasi Dalam Pemanfaatan Tenaga Nuklir".
6. Pusat Pendayagunaan Informatika dan Kawasan Strategis Nuklir BATAN, "Standar Operasional Prosedur Pengambilan Sampel Air Lingkungan, SOP 177.003/KN 04 02/ISN 5.2," 2015.
7. Pusat Pendayagunaan Informatika dan Kawasan Strategis Nuklir BATAN, "Standar Operasional Prosedur Pengoperasian dan Perawatan Spektrometer Gamma, SOP 183.003/KN 04 02/ISN 5.2," 2015.
8. Pusat Pendayagunaan Informatika dan Kawasan Strategis Nuklir BATAN, "Standar Operasional Prosedur Analisis Spektrometer Gamma, SOP 168.003/KN 04 02/ISN 5.2," 2015.

ANALISIS KEGAGALAN PROSES PEMBANGKIT UAP PADA INSTALASI PENGOLAHAN LIMBAH RADIOAKTIF CAIR

Budiyono, Sugianto

Pusat Teknologi Limbah Radioaktif-Badan Tenaga Nuklir Nasional
Kawasan Puspiptek Serpong Gedung 50, Tangerang Selatan, Banten 15310
E-mail: budibtdd@batan.go.id

ABSTRAK

ANALISIS KEGAGALAN PROSES PEMBANGKIT UAP PADA INSTALASI PENGOLAHAN LIMBAH RADIOAKTIF CAIR. Pusat Teknologi Limbah Radioaktif menggunakan pembangkit uap (*boiler*) sebagai alat penunjang proses pengolahan limbah radioaktif cair. Permasalahannya, ketika proses operasi berlangsung, sistem *boiler* mengalami kegagalan *startup*. Proses pengolahan limbah menjadi tertunda dan *boiler* harus diperbaiki. Tahap identifikasi kegagalan merupakan bagian dari kegiatan perawatan. Penyebab kegagalan harus dianalisis agar proses pengembalian fungsi *boiler* berlangsung dengan cepat dan tepat. Analisis dilakukan dengan metode pengujian komponen yang berpengaruh terhadap proses operasi. Hasil analisis menunjukkan bahwa kegagalan proses *boiler* diakibatkan oleh kerusakan modul kontrol. Respon *flame* detektor terhadap cahaya masih bagus. Resistansi dan arus detektor masih memenuhi standar operasi yang ditentukan saat ada dan tidak ada cahaya api. Resistansi detektor terukur 765 Ω ketika menerima cahaya dan terukur tak terhingga ketika tanpa cahaya. Arus listrik detektor terukur 0 ketika tanpa cahaya dan terukur 24 μA saat menerima cahaya. Modul kontrol gagal mengeluarkan sinyal tegangan pada pin 23 sehingga ada atau tidak cahaya api yang diterima *flame detektor*, pin 22 tidak mendapat sinyal informasi. Proses *startup* menjadi *lockout* karena tidak adanya sinyal informasi api. Solusinya adalah harus dilakukan penggantian modul kontrol untuk menghilangkan penyebab kegagalan agar proses pengolahan limbah radioaktif cair dapat kembali berlangsung.

Kata kunci: analisis, kegagalan pengapian, detektor api, pembangkit uap,

ABSTRACT

PROCESS FAILURE ANALYSIS OF BOILER IN LIQUID RADIOACTIVE WASTE INSTALLATION. Center for Radioactive Waste Technology using boilers as a means of supporting the liquid radioactive waste treatment process. The problem is, when the operation took place, the boiler system startup failure. Waste treatment process to be delayed and the boiler must be repaired. Phase identification of the failure of a part of the treatment. The cause of the failure must be analyzed so that the process of restoration of the boiler takes place quickly and precisely. The analysis was performed by the method of testing components that affect the operation process. The analysis concluded that the failure of the boiler caused by damage to the control module. Flame detector response to light was still good. Resistance and current detectors still meet the standards specified operation when there is no light and fire. The detector resistance measured 765 Ω when receiving light and infinitely scalable when no light. Electrical current of detector measured 0 when no light and measured 24 μA when receiving light. Control module failed to issue a voltage signal at pin 23 so that there is or is not acceptable firelight flame detectors, pin 22 does not receive the information signal. The startup process becomes lockout due to the absence of information signal fire. The solution is to do the replacement of the control module to eliminate the cause of the failure so that liquid radioactive waste treatment process can take back

Keyword: analysis, flame failure, flame detector, boiler

PENDAHULUAN.

Instalasi Pengolahan Limbah Radioaktif (IPLR) menggunakan *boiler* sebagai alat pembangkit uap untuk proses pengolahan limbah radioaktif cair. Energi uap digunakan untuk memanaskan 50 m³ limbah radioaktif cair menjadi 1m³ konsentrat [1]. *Boiler* IPLR adalah jenis pipa api sistem 4 aliran. Api ditimbulkan dari pembakaran bahan bakar solar pada *burner* di ruang bakar. Api mengalir pada lorong pipa api utama, pipa api fase kedua dan ketiga selanjutnya menuju cerobong. Proses perpindahan panas terjadi di sepanjang pipa api

secara radiasi, konduksi dan konveksi ke air. Boiler dengan sejumlah panas tertentu dapat menghasilkan uap panas lanjut atau uap jenuh. Panas ini digunakan untuk menguapkan limbah cair dalam evaporator sehingga menjadi konsentrat. Uap yang keluar dari evaporator, tekanan dan suhunya turun sehingga terjadi campuran uap dan air (kondensat). Kondensat dikembalikan ke *boiler* bercampur dengan air baku yang sudah dilunakkan agar temperatur air umpan mendekati titik didih air dan pemakaian bahan bakar menjadi lebih hemat. Proses pembentukan uap terjadi akibat ada perpindahan panas dari api secara radiasi ke dinding pipa,

kemudian diteruskan secara konduksi pada pipa menuju dinding yang bersentuhan dengan air, selanjutnya secara konveksi dari dinding pipa ke air yang paling dekat dengan pipa api. Air yang paling dekat dengan pipa mengalami perubahan panas sehingga berat jenisnya turun dan air tersebut naik ke permukaan untuk digantikan dengan air yang lebih dingin. Proses seterusnya terjadi secara berulang hingga terbentuk uap. Uap yang dihasilkan adalah uap panas lanjut. Uap dihasilkan dari pemanasan air umpan hingga mencapai temperatur $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ pada tekanan $8,3\text{ kg/cm}^2$. Agar efisiensi pemanasan tetap tinggi, pipa api dibersihkan secara periodik untuk menghilangkan jelaga yang menempel pipa bagian dalam dan dinding luar pipa yang terdapat kerak. Uap dialirkan kedalam evaporator untuk mengkonsentrasikan limbah radioaktif cair.

Pada proses pengolahan limbah radioaktif cair dengan evaporator, *boiler* dioperasikan selama satu minggu. Disaat proses operasi hari ke 3, boiler otomatis *shutdown* karena tekanan telah mencapai 8 bar sesuai pengaturan *cutoff*. Proses pengolahan limbah masih berlangsung dan tekanan uap berangsur-angsur turun mencapai tekanan 7 bar. Secara otomatis *boiler* hidup kembali dan memulai proses *startup*. Ketika proses *startup*, *boiler*

lockout dengan indikator *flame failure* menyala. Setelah di *reset*, *boiler* kembali *startup* namun tetap mengalami kegagalan pengapian. Tiga kali *reset* dan *startup* dilakukan, hasilnya tetap sama sehingga *boiler* harus diperbaiki.

Untuk mengembalikan fungsi kerja *boiler* dalam mendukung proses pengolahan limbah maka harus dilakukan perawatan. Salah satu tahapan penting perawatan adalah analisis kegagalan. Kegiatan analisis bertujuan untuk mengetahui penyebab kegagalan dan kemungkinan tindaklanjut perbaikannya.

Makalah ini menguraikan tentang analisis kegagalan proses *boiler* pada instalasi pengolahan limbah radioaktif cair.

TINJAUAN SISTEM *BOILER*

Boiler adalah bejana bertekanan yang didesain untuk menghasilkan uap panas (*steam*). Air yang masuk ke *boiler* mengalami proses kenaikan suhu dan *entropy* untuk merubah fasa cair menjadi fasa uap sebelum keluar dari *boiler* dalam suhu dan *entropy* tinggi [2]. Uap panas pada tekanan dan suhu tinggi selanjutnya dikirim ke alat penukar panas untuk digunakan. Gambar *boiler* di Instalasi Pengolahan Limbah Radioaktif ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. *Boiler* di Instalasi Pengolahan Limbah Radioaktif

Komponen penting *boiler* yang berpengaruh pada kegagalan proses harus

dipelajari dan dipahami. Komponen penting pada proses *boiler* IPLR adalah sebagai berikut;
Pengapian

Pengapian terdiri atas *feeder* bahan bakar solar, bahan bakar elpiji dan busi pematik. *Feeder* bahan bakar solar berfungsi menyebarkan bahan bakar ke permukaan kisi pembakaran hingga terbakar [3]. Elpiji sebagai bahan bakar awal dan busi pematik sebagai penghasil api dikendalikan oleh panel kontrol dengan pengaktifan selenoide *valve* dan trafo tegangan. Pembakaran berlangsung di ruang bakar dan harus berakhir sebelum aliran gas panas memasuki lintasan fase II. Dalam lintasan fase II terdapat pipa-pipa pembangkit uap dimana permukaannya dipanasi oleh gas panas. Gas panas yang melintasi fase II akan memberikan panas ke permukaan pipa-pipa pemanas uap lanjut yang terdapat di fase III. Kemudian gas panas dari fase III dilalukan pada pipa akhir lintasan dalam ketel.

Air Boiler

Air boiler merupakan media yang akan diuapkan pada tekanan dan suhu tertentu. Sebelum air diuapkan, bahan kimia diinjeksikan ke dalam *water softener* untuk memenuhi standar air *boiler*. Air umpan dilalukan *deaerator tank* agar oksigen yang terlarut berkurang. Air diuapkan dari tangki *feed Water* ke dalam ketel menggunakan pompa. Sirkuit air umpan dilengkapi dengan katup yang bekerja otomatis sesuai kondisi level air dalam ketel.

Udara

Udara pembakaran dimasukkan ke ruang bakar menggunakan motor *fan*. Motor *fan* bekerja dengan kendali otomatis. Luas pembukaan saluran udara diatur menggunakan *balancing damper* bersamaan dengan pembukaan *regulator valve* bahan bakar. Udara masuk ke ruang bakar dengan kecepatan tinggi hingga terjadi pengabutan bahan bakar.

Uap Air

Uap basah *boiler* dikumpulkan di ruang uap dari drum. Uap dipisahkan dengan air menggunakan *deflector* yang terdapat pada bagian dalam sepanjang drum. Selanjutnya uap mengalir ke pemanas uap lanjut melalui pipa untuk kembali dipanaskan hingga menjadi *superheated steam*. Temperatur pemanasan tergantung pada temperatur gas asap. Pada beban rendah temperatur uap sekitar 170 °C, dan pada beban puncak temperature *steam* bisa mencapai 260 °C.

Pengatur Level Air

Pengatur *level* permukaan air sangat penting untuk keamanan proses *boiler*. Pengatur

level permukaan dilengkapi dengan batas atas dan batas bawah. Tinggi permukaan air harus diatas batas bawah untuk mencegah terjadinya pemanasan lebih dari permukaan yang dipanaskan. Tiga buah *valve* berfungsi sebagai pengatur volume air masuk. Jika level air menyentuh batas bawah maka *valve* akan membuka yang digerakkan oleh *coil*. Demikian juga sebaliknya, jika posisi air dalam ketel menyentuh level atas, maka *valve* akan menutup. Jika posisi air dibawah batas bawah maka semua aliran listrik akan mati kecuali *feed water pump*. Sebuah gelas penduga dipasang untuk mengetahui ketinggian permukaan air didalam ketel. Gelas penduga rutin dilakukan pencucian untuk menghindari terjadi penyumbatan dan *level* air tidak bisa dibaca.

Katup Pengaman

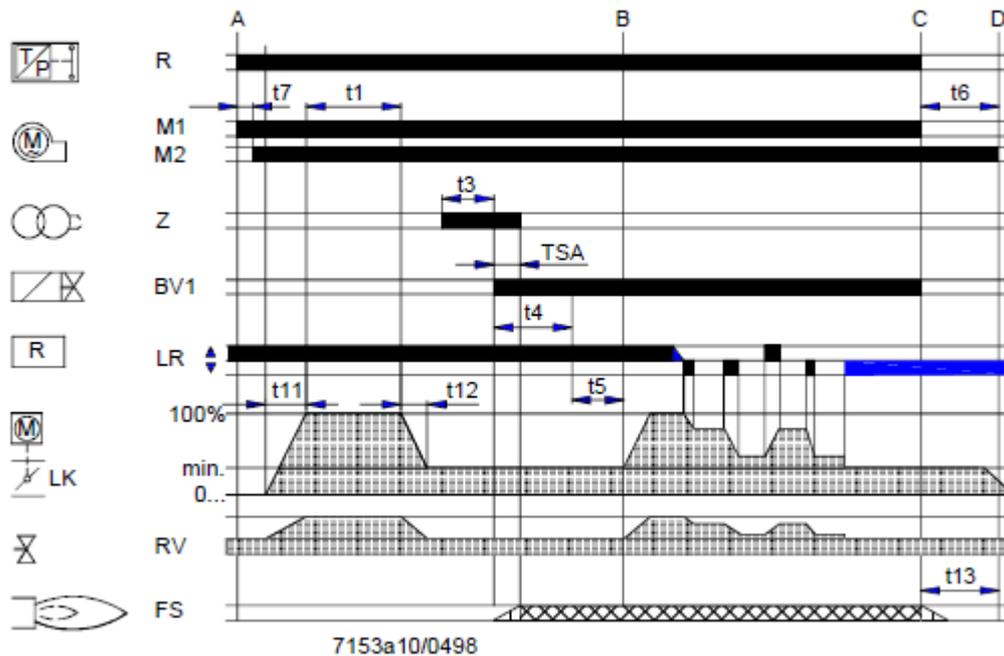
Boiler dilengkapi dengan dua buah *safety valve type spring loaded* yang terpasang pada drum bagian atas untuk pengaman jika terjadi *over pressure*. *Safety valve* diatur sesuai spesifikasi maksimum. *Safety valve* pertama diatur 0,5 kg/cm² diatas tekanan kerja dan *safety valve* kedua diatur 0,8 - 1 kg/cm² diatas tekanan kerja. Pipa *blow down* disesuaikan ukurannya dengan ukuran lubang pembuangan dari *safety valve*.

Katup Pembuangan

Tiga buah *gate valve* yang terhubung dengan *super heater header* digunakan untuk pembuangan kondensat pada pemanas uap lanjut. Dua buah *gate valve* yang terpasang pada drum atas dan pipa *outlet steam* sebelum *super heater* digunakan untuk membuang udara yang terperangkap didalam ketel *boiler*. Sewaktu-waktu air didalam drum atas dibuang bila total zat-zat yang tidak terlarut telah mencapai batas tertentu. Untuk mengeluarkan air *boiler* digunakan *blowdown valve* yang terpasang pada drum bagian atas. Katup ini bekerja bila kadar zat-zat yang tidak terlarut mencapai batas tertinggi yang diizinkan.

Kendali Proses

Kendali utama proses boiler menggunakan *oil modul control* merek Siemens tipe LAL 2.25. Kendali berjenis *yellow - flame burner* dengan pengawasan tekanan udara. Sensor api menggunakan detektor *photo resistive QRB1*. Gambar diagram kendali boiler IPLR ditunjukkan pada Gambar 2.



- Keterangan
- R = Kontrol suhu dan tekanan
 - Z = Ignition transformer
 - M1, M2 = Motor fan
 - BV1, BV2 = Katup bahan bakar
 - LR = Kontrol beban
 - LK = Damper udara
 - FS = Sinyal api

Gambar 2. Diagram kendali boiler IPLR [4]

Prinsip kerja diagram kendali pada Gambar 2 adalah, kontrol suhu dan tekanan (R) selalu aktif sejak daya diumpungkan. Sesaat setelah saklar daya utama aktif, *blower fan* M1 bekerja untuk menghisap udara luar masuk ke ruang bakar yang diikuti dengan *blower fan* M2. Bekerjanya *fan* akan diikuti berfungsinya *damper* udara (LK) yang mengatur besar kecilnya luas saluran udara yang dihisap *blower fan*. *Ignition transformer* (Z) bekerja dengan mensuplai daya listrik ke busi pada *burner* sehingga menghasilkan api untuk pembakaran. Selang waktu T3, katub bahan bakar (BV1) dan pompa bahan bakar bekerja untuk memasukkan bahan bakar solar ke ruang bakar. Pembakaran terjadi setelah bertemunya bahan bakar, api dan udara di dalam ruang bakar. Nyala api dipantau menggunakan sensor api untuk mengetahui kualitas api didalam ruang bakar. Jika kualitas api tidak memenuhi syarat maka operasi akan dihentikan. Kontrol beban bekerja terus menerus untuk mengatur pembukaan *damper* udara dan

katub bahan bakar berdasarkan informasi suhu dan tekanan uap yang dipantau oleh R.

METODE

Analisis menggunakan metode pengujian komponen yang berpengaruh terhadap pengoperasian *boiler* untuk mengetahui penyebab kegagalan. Tahapan pengujian meliputi pengujian komponen proses, pengujian *flame detector*, dan pengujian modul kontrol.

Pengujian komponen proses boiler

Pengujian komponen untuk persiapan operasi dilakukan terhadap persyaratan level air, sensor level, pompa *makeup*, katup pengaman dan katup pembuangan. Pemantauan *boiler* pada saat *startup* dilakukan untuk memastikan bahwa *sequence* operasi berjalan normal. Kegiatan dimulai dengan pemantauan kinerja motor *fan* dan motor pompa bahan bakar ketika posisi "On" dilanjutkan dengan pemantauan kinerja *solenoid* gas elpiji dan *ignition transformer*

sampai terbentuk nyala api. Sesaat setelah terdapat nyala api dari busi, katup bahan bakar dipastikan terbuka dan pompa beroperasi dengan indikator adanya tekanan 600 kPa di *pressure gauge*. Pembakaran api utama dipastikan dengan melihat indikator *main flame* menyala. Pengujian komponen dihentikan ketika boiler secara otomatis *lockout* pada posisi *start up*.

Pengujian *flame detector*

Flame detector dilepas dari modul kontrol untuk dilakukan pengujian secara mandiri. Resistansi diukur menggunakan ohmmeter ketika detektor menerima cahaya dan tidak menerima cahaya. Kemudian detektor diberi sumber daya listrik untuk dilakukan pengukuran arus listrik. Pengukuran menggunakan multimeter pada kondisi detektor menerima cahaya dan tanpa cahaya. Berdasarkan spesifikasi, *flame detector* mensuplai arus listrik ke modul kontrol berkisar antara 8 - 35 μA ketika menerima cahaya dan maksimum arus 0,8 μA ketika tanpa ada cahaya [5]. Pengukuran arus listrik *flame detector* juga dilakukan saat tanpa dan ada cahaya pada posisi detektor terhubung ke modul kontrol.

Pengujian modul kontrol

Pengujian modul kontrol dimulai dengan memantau respon *start* modul terhadap penyambungan saklar antara terminal 4 dan 5. Terminal 6 dipastikan mengeluarkan suplai daya untuk mengoperasikan motor *fan* dan terminal 7 mengeluarkan daya untuk mengoperasikan motor gas buang. Setelah menyelesaikan waktu T16, perintah kontrol membuka *dampner* udara disampaikan melalui terminal 9. Terminal 8 tidak menerima perintah selama waktu *positioning*. Urutan tahapan terus berjalan ketika peredam udara telah menutup sepenuhnya. Waktu proses mengikuti diagram yang terlihat pada Gambar 2.

Pengujian dilanjutkan pada saat *prepurge time* dimana *dampner* udara terbuka penuh. Kebenaran fungsi rangkaian pemantau api diperiksa selama waktu T1. Kontrol *burner* memulai *lockout* jika ada kegagalan rangkaian. Sesaat setelah *start* waktu t1, dipastikan saklar tekanan udara berpindah dari terminal 13 ke terminal 14. Jika kondisi tidak terpenuhi maka kontrol *burner* otomatis *lockout*.

Pada *preignition time* pendek, *ignition transformer* terhubung ke terminal 16 dan suplai bahan bakar diperintahkan dari terminal 18. Sedangkan pada waktu *preignition* panjang *ignition transformer* terhubung ke terminal 15.

Ketika beban berubah, *trafo* diaktifkan paling lambat pada waktu akhir t10. Setelah menyelesaikan waktu t1, *drive* peredam udara ke posisi rendah api melalui terminal 10. Selama waktu *positioning*, saklar urutan akan mempertahankan posisinya sampai terminal 8 menerima daya. Motor dari saklar urutan dialihkan ke bagian kontrol LAL2.25.

TSA adalah waktu pemantauan keselamatan api. Setelah menyelesaikan waktu TSA, sinyal api harus ada pada terminal 22. Kondisi tersebut harus terpenuhi sampai adanya perintah *shutdown*, jika tidak maka kontrol *burner* akan di *lockout*. Pengujian dihentikan pada tahap ini karena ada perintah *lockout* di modul kontrol.

PEMBAHASAN

Pengujian Komponen Proses

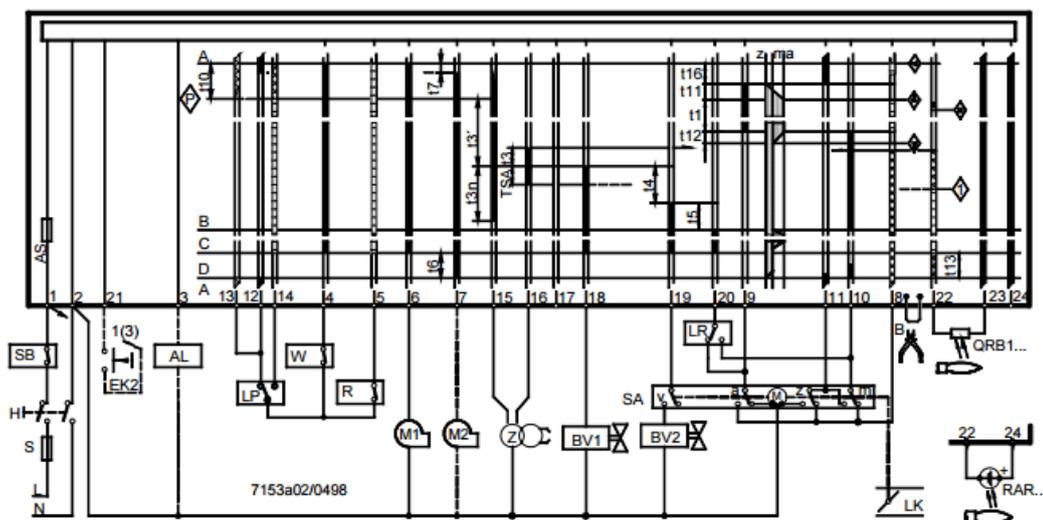
Pengujian dilakukan terhadap komponen *boiler* yang berpengaruh pada kegiatan proses operasi. Hasil pengujian komponen proses diperlihatkan pada Tabel 1.

Hasil pengujian komponen untuk persiapan operasi yang terlihat pada Tabel.1, menunjukkan bahwa level air *boiler* pada posisi *high* sehingga memenuhi syarat untuk proses operasi *boiler*. Jika level air lebih rendah dari posisi indikator *low* maka kontrol operasi akan *lockout*. Pengatur level air berfungsi baik yang diindikasikan oleh aktifnya pompa *makeup* ketika *low* level dan nonaktif ketika *high* level. Katup pengaman dan katup pembuangan juga berfungsi baik setelah melalui proses pengujian. Komponen-komponen tersebut layak dan memenuhi syarat untuk dilakukan *start up* operasi *boiler*.

Pada pengujian *startup*, tekanan bahan bakar solar mencapai 600 kpa sehingga memungkinkan untuk terjadinya pengapian. Tekanan 1200 kpa dicapai hanya pada saat *main flame*. Ketika *startup*, *ignition transformer* bekerja dengan baik dan mengirim daya listrik ke busi. *Ignition transformer* dan busi pemantik berkinerja baik yang diindikasikan dengan adanya suara memantik dan munculnya cahaya api yang terlihat melalui *sighglass*. *Dampner* udara membuka dan menutup sempurna sesuai perintah kontrol *dampner*. Kendali proses berfungsi baik pada awal *startup* tetapi terjadi *lockout* ketika waktu pemantauan keselamatan api. Diagram proses *boiler* ditunjukkan pada Gambar 2.

Tabel 1. Data hasil pengujian komponen proses boiler

No	Nama komponen	Kondisi operasi	Standar operasi
1	Air boiler Level air	level pada posisi <i>high</i>	$low \leq level \leq high$
2	Pengatur level air - Sensor level - Pompa <i>make up</i>	- <i>low = on, high = off</i> - tekanan 5 bar	- <i>low = on, high = off</i> - tekanan 5 bar
3	Katup pengaman	tekanan = 135 psi	tekanan = 135 psi
4	Katup pembuangan	berfungsi baik	berfungsi baik
5	Pengapian - Gas elpiji - Bahan bakar solar - <i>Ignition transformer</i>	- tekanan 3,5 psi - tekanan = 600 kpa - menghasilkan api yang terlihat melalui <i>sigh glass</i>	- tekanan < 3,5 psi - tekanan= 600-1200 kpa - menghasilkan api yang terlihat melalui <i>sigh glass</i>
6	Udara - Damper udara - Regulator udara	- <i>open/close</i> sempurna - berfungsi baik	- <i>open/close</i> sempurna - berfungsi baik
7	Kendali proses	berhenti operasi ketika <i>start up</i>	Beroperasi dari <i>start</i> sampai <i>off</i>
8	Uap air - Tekanan - Sensor tekanan	- -	- 125 psi - $80 \text{ psi} \leq \text{operasi} \leq 125 \text{ psi}$



Gambar 2. Diagram proses operasi boiler

Kegagalan operasi boiler bisa disebabkan oleh beberapa kemungkinan. Jika kegagalan terjadi sebelum *startup*, dimungkinkan karena salah satu kontak tidak terhubung akibat dari adanya persyaratan praoperasi yang tidak terpenuhi.. Tetapi jika kegagalan terjadi ketika proses *startup* maka penyebabnya adalah salah satu atau lebih dari kemungkinan berikut; busi tidak menyala, tekanan bahan bakar tidak terpenuhi karena bocor, rangkaian alat pemantau api tidak bekerja, tidak ada sinyal *OPEN* di terminal 8 saat *changeover* saklar, terminal 6, 7 dan 15 terjadi gangguan sinyal, ada informasi

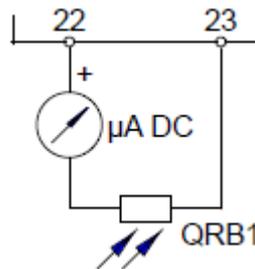
kegagalan tekanan udara, atau karena tidak adanya sinyal api pada waktu pemantauan keselamatan api.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa kegagalan boiler terjadi ketika proses *startup* pada posisi waktu pemantauan keselamatan api. Kemungkinan besar penyebab kegagalan tinggal dua yaitu kerusakan *flame* detektor dan atau kerusakan modul kontrol. Untuk memastikannya maka dilakukan pengujian pada kedua komponen.

Pengujian *Flame* Detektor

Ketika dilakukan pengujian *startup* secara berulang, operasi *boiler* tetap gagal dengan indikator kegagalan pengapian/ *flame failure*. Pada proses awal *startup*, *boiler* bekerja sesuai urutan yang benar sampai tahap penyalaan awal gas elpiji pada busi. Kemudian *boiler*

terjadi *lockout* karena sensor nyala api tidak sampai ke modul kontrol. Oleh karenanya dilakukan pengujian dan pengukuran pada *flame* detektor untuk mengetahui kinerja komponen. Rangkaian *flame* detektor QRB1 pada modul *boiler* ditunjukkan pada Gambar 3 dan data hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 2.



Gambar 3. Rangkaian *flame* detektor QRB1 pada modul *boiler*

Tabel 2. Data hasil pengujian *flame* detektor QRB1

No	Pengujian	Kondisi operasi	Standar operasi
1	Tahanan detektor		
	- Dengan cahaya - Tanpa cahaya	- 765 Ω - tak terhingga	- < 800 Ω - tak terhingga
2	Arus listrik detektor		
	- Dengan cahaya - Tanpa cahaya	- 0 - 24 µA	- < 0,8 µA - 8 – 35 µA

Flame detektor diukur tahanan dan arus listriknya pada saat ada cahaya dan tanpa cahaya. Pengukuran dimaksudkan untuk mengetahui respon detektor terhadap keberadaan api didalam ruang bakar *boiler*. Hasil pengujian sebagaimana yang ditunjukkan pada Tabel 2, bahwa respon *flame* detektor terhadap cahaya masih bagus. Tahanan dan arus detektor saat ada dan tidak ada cahaya api masih memenuhi standar operasi yang ditentukan. Tahanan detektor ketika menerima cahaya terukur 765 Ω dan tanpa cahaya terukur tak terhingga. Arus listrik detektor ketika tanpa cahaya terukur 0 dan saat menerima cahaya terukur 24 µA.

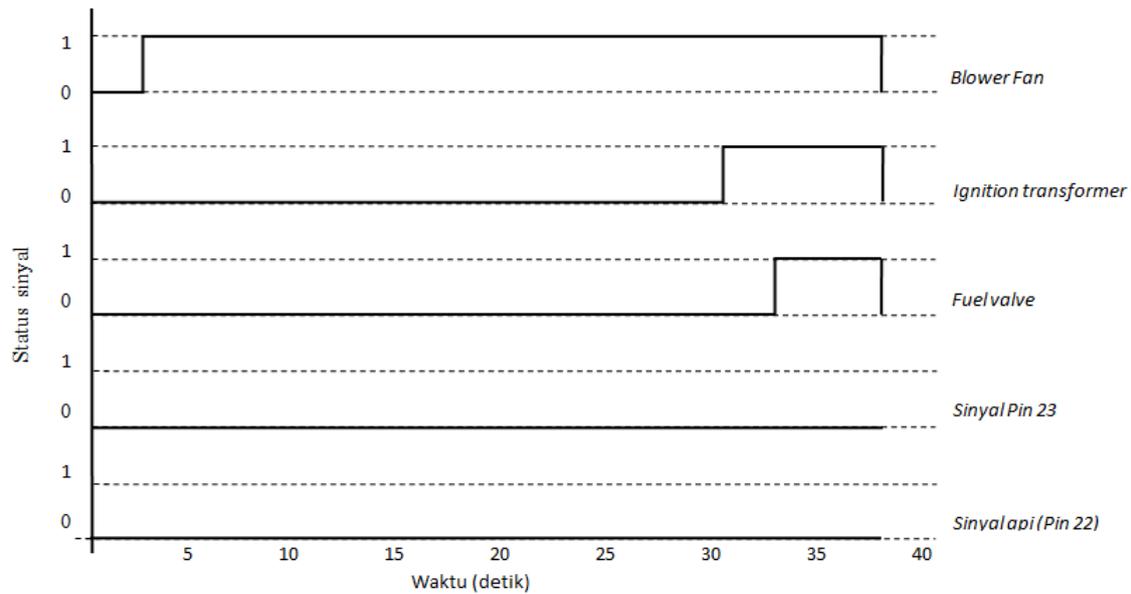
Pengujian Modul Kontrol

Kemungkinan penyebab kegagalan yang kedua setelah *flame* detektor adalah kegagalan modul kontrol. Pengujian modul kontrol dilakukan untuk mengetahui kinerja komponen selama proses *startup*. Data pengujian status sinyal operasi modul kontrol per satuan waktu diperlihatkan pada Gambar 4. Sedangkan data

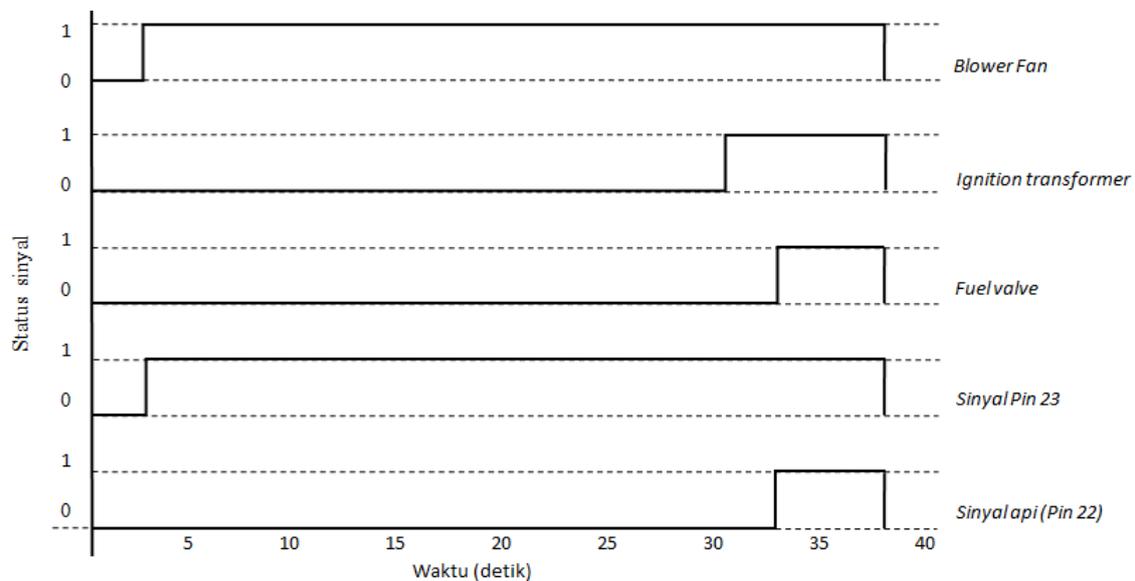
standar status sinyal operasi modul kontrol per satuan waktu diperlihatkan pada Gambar 5.

Kedua gambar menunjukkan perbedaan pada sinyal pin 23 dan pin 22. Pada data standar terlihat bahwa sinyal pin 23 harus muncul sesaat setelah saklar *start* dihubungkan. Sedangkan sinyal api untuk input pin 22 juga harus ada ketika waktu pemantauan keselamatan api. Data hasil pengujian modul tidak menunjukkan hasil yang sesuai standar, pin 22 dan pin 23 tetap tidak menunjukkan adanya sinyal. Padahal sebagaimana terlihat pada Gambar 1 bahwa kedua pin terhubung ke *flame* detektor.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa kegagalan proses operasi *startup* diakibatkan oleh kegagalan modul kontrol. Karena pin 23 tidak mengeluarkan sinyal tegangan yang akan diubah menjadi arus listrik untuk diumpankan ke pin 22 sebagai informasi adanya cahaya. Diketahui bahwa *flame* detektor berjenis *photo resistive* dimana tahananannya berubah mengecil ketika terkena cahaya. Akibat tahanan mengecil, arus listrik akan mengalir melalui *flame* detektor masuk ke pin 22.



Gambar 4. Data status sinyal operasi modul kontrol per satuan waktu



Gambar 5. Data standar status sinyal operasi modul kontrol per satuan waktu

Kegiatan analisis berhasil mengetahui penyebab kegagalan proses pembangkit uap pada Instalasi Pengolahan Limbah Radioaktif Cair. Pengolahan limbah cair dapat berlangsung jika unit evaporator dan unit boiler dapat beroperasi sempurna. Proses pengolahan limbah cair secara evaporasi dapat dilakukan jika didukung dengan sistem pembangkit uap. Boiler membangkitkan uap untuk memanaskan 50 m³ limbah radioaktif cair menjadi 1m³ konsentrat. Uap yang dihasilkan hingga mencapai temperatur 160 °C pada tekanan 8,3 kg/cm². Hasil analisis menunjukkan bahwa kegagalan proses pengolahan

limbah diakibatkan oleh kegagalan fungsi boiler. Boiler tidak dapat memproduksi uap karena sistem kontrol tidak berfungsi.

Untuk mengembalikan fungsi kerja boiler dalam mendukung proses pengolahan limbah maka harus dilakukan perbaikan dengan penggantian modul kontrol. Jika modul kontrol berfungsi, dipastikan unit boiler akan bekerja kembali dalam membangkitkan uap panas. Tersedianya uap panas yang sesuai spesifikasi memungkinkan dilakukan kembali pengolahan limbah radioaktif cair di IPLR.

KESIMPULAN

Dari bahasan diatas dapat ditarik kesimpulan bahwa kegagalan proses *boiler* disebabkan oleh kerusakan modul kontrol. Respon *flame* detektor terhadap cahaya masih bagus. Tahanan dan arus detektor saat ada dan tidak ada cahaya api masih memenuhi standar operasi yang ditentukan. Tahanan detektor ketika menerima cahaya terukur 765 Ω dan tanpa cahaya terukur tak terhingga. Arus listrik detektor ketika tanpa cahaya terukur 0 dan saat menerima cahaya terukur 24 μA . Modul kontrol gagal karena tidak mampu mengeluarkan sinyal tegangan pada pin 23. Oleh karenanya, ada atau tidak cahaya api yang diterima, pin 22 tidak mendapatkan sinyal informasi. Tidak adanya informasi cahaya api menyebabkan munculnya perintah *lockout* ketika proses *startup* sedang berlangsung. Oleh karena itu harus dilakukan penggantian modul kontrol untuk menghilangkan penyebab kegagalan proses pembangkitan uap agar pengolahan limbah radioaktif cair dapat kembali dilaksanakan.

DAFTAR PUSTAKA

1. Heri Witono, "Pengoperasian *Boiler* Sebagai Energi Penguapan Proses Evaporasi Limbah Cair IPLR Tahun 2013", Hasil Penelitian dan Kegiatan, PTLR, Serpong, 2013.
2. Estiko Rijanto, "Sistem Kontrol Boiler Dan Retrofit" Workshop on Boiler Technology Update and The Era of Clean Technology, Babcock & Wilcox Asia, PT. Indonesia Power dan LIPI, Jakarta, 2012.
3. Mukti Rohman, "Prinsip Kerja Boiler" <http://muktirohman.blogspot.co.id/2013/06/prinsip-kerja-boiler.html>
4. Siemens, Oil burner control, Siemens Building Technologies HVAC Products, 2002.
5. Siemens, Photo Resistive, Siemens Building Technologies HVAC Products, 2008

JAMINAN MUTU LAYANAN EVALUASI DOSIS PERORANGAN DENGAN TLD BARC DI PTKMR-BATAN

Nazaroh, Rofiq Syaifudin, Sri Subandini Lolaningrum, dan Nina Herlina

Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi

Badan Tenaga Nuklir Nasional

E-mail : *nazaroh_s@batan.go.id*

ABSTRAK

JAMINAN MUTU LAYANAN EVALUASI DOSIS PERORANGAN DENGAN TLD BARC DI PTKMR-BATAN. Berdasarkan rekomendasi ICRP no.60/1990 dan PERKA BAPETEN No. 4/2013, nilai batas dosis (NBD) yang boleh diterima pekerja radiasi mengalami penurunan dari 50 mSv menjadi 20 mSv/tahun, dikarenakan dosis yang dapat menyebabkan dampak negatif dari pemanfaatan radiasi mengalami penurunan. Penurunan nilai batas dosis ini memberikan sinyal kepada kita bahwa risiko radiasi harus diwaspadai. Sekecil apapun dosis radiasi yang tidak perlu, harus dihindari. Sebagai informasi, lebih dari 1000 instansi di Indonesia menggunakan TLD BARC dan lebih dari 40000 TLD BARC/tahun digunakan untuk memonitor dosis yang diterima pekerja radiasi. Agar hasil evaluasi dosis akurat, PTKMR-BATAN menerapkan jaminan mutu pada system evaluasi dosis perorangan menggunakan TLD BARC, baik jaminan mutu internal maupun eksternal. Jaminan mutu internal didukung dengan pengkondisian ruang TLD Reader, pengamatan kondisi TLD Reader, pengamatan TLD yang akan dikirim ke pelanggan (verifikasi fisik, keseragaman TLD, pelabelan dan pencatatan), dan pengamatan terhadap kurva kalibrasi TLD dari tahun ke tahun, serta mengevaluasi dosis dengan memperhatikan jenis dan energy radiasi yang dimanfaatkan pengguna. Jaminan mutu eksternal dibuktikan dengan mengikuti program interkomparasi /audit mutu dosis yang diselenggarakan oleh Laboratorium Dosimetri Standar Sekunder (LDSS).

Kata kunci : Jaminan mutu, dosis perorangan, TLD, kalibrasi

ABSTRACT

QUALITY ASSURANCE IN SERVICES OF PERSONAL DOSE EVALUATION USING TLD BARC IN PTKMR-BATAN. Based on Recommendations of the ICRP No. 60/1990 and Perka BAPETEN 4/2013, the dose limit value (NBD) which may be accepted by radiation workers decreased from 50 mSv to 20 mSv / year, due to the dose that can cause negative effects of the use of radiation. Impairment dose limit is a signal to us that the risk of radiation should be increasingly considered. No matter how small the dose of radiation should be avoided. For information, more than 1000 institutions in Indonesia using TLD BARC and more than 40000 TLD BARC / year is used to monitor the radiation doses received by workers. In order to the evaluation of the dose accurately, PTKMR-BATAN perform quality assurance of BARC TLD system both internally and externally. Internal quality assurance supported by conditioning the room of TLD Reader, observing the condition of TLD Reader, observation TLD which will be delivered to customers (physical verification, uniformity of TLD, labeling and recording), and observation of the calibration curve of TLD from year to year, evaluate the dose by taking into account the type of and the radiation energy used by users. External quality assurance program is evidenced by participated in the dose quality audit conducted by the Secondary Standard Dosimetry Laboratory (SSDL).

Keywords: Quality assurance, personal dose, TLD, calibration/irradiation.

PENDAHULUAN

Pemantauan dosis perorangan terhadap pekerja radiasi merupakan bagian integral dari suatu program proteksi radiasi dan berdasarkan *Radiation Protection Rule*[1]/ Peraturan Perlindungan Radiasi - 1971 (RPR - 71), semua **menyediakan fasilitas dan/atau peralatan** yang sesuai dengan sifat dan risiko untuk setiap Pemanfaatan Tenaga Nuklir; dan **perlengkapan Proteksi Radiasi** sesuai dengan sifat dan risiko untuk setiap Pemanfaatan Tenaga Nuklir.

Salah satu perlengkapan proteksi radiasi adalah dosimeter perorangan/TLD (*Thermo Luminescens Dosimeter*). Dosimeter dapat

pekerja radiasi harus dipantau secara individu sebagaimana ditentukan oleh instansi yang berwenang. Pada Pasal 4 Perka BAPETEN No.4/2013 [2], Pemegang Izin harus bertanggung jawab atas Proteksi dan Keselamatan Radiasi di fasilitas atau instalasinya, yaitu dengan cara memonitor individu dari paparan radiasi dan tujuannya adalah untuk memastikan agardosis yang diterima pekerja radiasi tidak melebihi nilai batas dosis (NBD) dan untuk mendukung konsep ALARA.

Filosofi proteksi radiasi kini telah jauh berubah pada abad terakhir ini dan begitu juga kebutuhan dan harapannya. Saat ini batas dosis

tahunan yang dianjurkan didasarkan pada : hasil investigasi radiobiologik & epidemiologi dari resiko kesehatan akibat paparan radiasi pengion dan opini tentang risiko kesehatan tambahan, yang mungkin dapat diterima pekerja dan masyarakat. Dengan meningkatnya pengetahuan di lapangan, batas dosis telah secara bertahap dikurangi dan revisi terakhir tahun 1990, ICRP-60 [3] telah mengurangi batas dosis dari 50 mSv ke 20 mSv, rata-rata per tahun dan dari 5 mSv ke 1 mSv untuk publik.

Penurunan NBD menyebabkan tuntutan pada kebutuhan pemantauan individu dalam hal ketepatan, kinerja dan tingkat perekaman. Berdasarkan ICRP, nilai tingkat perekaman untuk layanan bulanan telah berkurang dari 0,42 mSv [ICRP - 24 (1977)] ke 0,17 mSv untuk [ICRP - 35 (1982)] dan sekarang 0,085 mSv [ICRP - 75 (1999)] untuk paparan kerja. Akibatnya, persyaratan pengujian jenis dosimeter, pengujian kinerja, dan aspek manajemen, pencatatan dan jaminan mutu menjadi lebih ketat.

Penurunan nilai batas dosis ini memberikan sinyal kepada kita bahwa risiko radiasi harus semakin diperhatikan. Sekecil apapun dosis radiasi harus dapat dicegah/dihindari. Untuk memberikan layanan evaluasi dosis yang akurat, PTKMR-BATAN menerapkan jaminan mutu pada system evaluasi dosis perorangan dengan TLD BARC baik internal maupun eksternal.

Jaminan mutu internal meliputi pengkondisian ruang baca TLD, persiapan TLD sebelum dikirim ke pelanggan (verifikasi fisik, annealing, pelabelan dan pencatatan agar tidak tertukar), pengecekan secara periodik stabilitas TLD Reader dengan mencatat EHT dan *Light source*, dan stabilitas system TLD : pengamatan kurva kalibrasi TLD dari tahun ke tahun. Program jaminan mutu eksternal dilakukan dengan mengikuti program interkomparasi yang diselenggarakan oleh Laboratorium Dosimetri Standar Sekunder (LDSS), dan mengamati hasil audit mutu dosisnya.

Seperti kita ketahui bahwa karakteristik peralatan dan bahan dapat berubah dengan fungsi waktu dan frekuensi pemakaian. Karena itu respon atau sensitivitas alat harus dicek sebelum digunakan maupun setelah digunakan beberapa periode/beberapa tahun. Demikian pula penggunaan TLD secara terus menerus untuk keperluan pemantauan dosis perorangan/pekerja radiasi, dapat menurunkan performa kinerja TLD tersebut. Untuk memastikan bahwa TLD tersebut dalam kondisi layak pakai atau dalam rentang toleransi yang diizinkan maka perlu jaminan mutu/ langkah-langkah yang harus dilakukan agar dapat menjamin mutu hasil pengujian/pengukurannya.

Jaminan kualitas/mutu (QA)[4] adalah semua kegiatan yang direncanakan dan sistematis yang dibutuhkan untuk memberikan kepercayaan yang cukup bahwa suatu produk/jasa akan memenuhi persyaratan mutu yang ditetapkan. Jaminan mutu adalah suatu cara untuk mencegah kesalahan/cacat pada produk/jasa pengukuran. Menurut ISO 9000, jaminan mutu merupakan bagian dari manajemen mutu, yang difokuskan pada penyediaan keyakinan bahwa persyaratan mutu akan dipenuhi. Penerapan jaminan mutu pada system TLD meliputi jaminan mutu internal dan eksternal, tujuannya adalah untuk memastikan agar hasil pengukuran TLD memadai.

Jaminan mutu internal/*quality control* dalam melayani evaluasi dosis perorangan di PTKMR-BATAN meliputi:

- pengkondisian ruang baca TLD,
- pengamatan EHT dan *Light source* pada TLD Reader,
- pengamatan keseragaman TLD
- pengamatan kurva kalibrasi/respon TLD BARC secara periodik dari tahun ke tahun.

Jaminan mutu eksternal, diterapkan dengan berpartisipasi pada kegiatan interkomparasi pengukuran dosis menggunakan TLD (interkomparasi audit mutu dosis) yang diselenggarakan oleh Laboratorium Dosimetri Standar Sekunder (LDSS).

METODOLOGI

Pengamatan suhu dan *humidity*, EHT dan *Light Source*, Annealing, Pengukuran output dan kalibrasi

Untuk kestabilan TLD Reader, ruang TLD-Reader harus dikondisikan dan dipantau. Suhu dan *humidity* ruangan dicatat. Rentang suhu di ruang TLD-Reader harus berkisar antara $(23\pm 3)^{\circ}\text{C}$, dan *humidity* 40-70%.

Kestabilan TLD-Reader dapat dipantau dari bacaan EHT dan *Light Source*(LS). Apabila bacaan EHT dan LS stabil maka dapat dikatakan bahwa TLD-Reader stabil. Untuk itu bacaan EHT dan LS dicatat dan diplot, bila berada dalam rentang LWL dan UWL, kita dapat membuktikan bahwa TLD-Reader BARC /TL 1010S stabil.

Annealing TLD

TLD BARC [CaSO₄:Dy] [5] adalah dosimeter termoluminisensi yang terbuat dari bahan CaSO₄: Dy.TLD BARC adalah TLD buatan India, yang terdiri dari 3 elemen/chip/disk di dalam kartu TLD, berbentuk lingkaran dengan tebal 1 mm, yaitu D₁, D₂ dan D₃ (Gambar 6). D₁ adalah bacaan dosimeter di bawah filter Cu-Al.

D₂ adalah bacaan dosimeter di bawah jendela plastic. D₃ adalah bacaan dosimeter di bawah jendela yang terbuka (*open window*). Disk terbuat dari bahan Teflon 1:3, $z_{\text{eff}} = 15,1$ dan densitas TLD 2,52 g/cm³. *Softening point of Teflon* 330°C, *main glow peak temperature* :230°C, sensitivitas disk TLD =30-40x TLD-100. *Fading* : 2-3%/dalam 6 bulan. Pengaruh cuaca dan cahaya matahari dapat diabaikan bila ditutup dengan kertas/polyethylene. Dosisnya linier pada rentang 0,1 sampai 20 mSv (± 10). Dapat digunakan selama 20 x pemakaian (± 5 tahun). Respon energy TLD bergantung pada energy foton (30-200 keV), di atas 200 keV relative datar. Dimensi kartu TLD Al : 52,5 mm x 30 mm x 1 mm, diameter lubang dalam pelat aluminium (Al) : 12 mm, dan diameter disk TLD : 13,3 mm.

Jaminan mutu internal yang dilakukan terhadap TLD BARC adalah melakukan *annealing* terhadap TLD yang akan digunakan oleh user/dikirim ke user. TLD di-*annealing* dengan oven yang terkalibrasi. Oven dicek setiap bulan menggunakan system thermocouple atau thermometer sehingga ketidakpastian oven harus pada rentang $\pm 2^\circ\text{C}$. Tidak boleh lebih dari 500 kartu TLD yang di-*annealing* di dalam oven. Keseragamannya dapat dicek dengan TLD reader, dimana seharusnya bacaan keseragaman TLD sedekat mungkin dengan *background* (50-60) μSv .

Untuk melakukan *annealing* kartu TLD pelanggan, persiapan yang harus dilakukan adalah membersihkan kartu TLD dan nampannya dengan acetone dan dikeringkan pada suhu kamar sekitar 6-12 jam. Nampannya yang berisi kartu TLD diletakkan pada oven, dan suhu dinaikkan dari suhu ruang hingga 230°C, dipanaskan selama 4 jam. Kartu TLD dikeluarkan/ dipindahkan dari oven ketika suhu di bawah 80°C.

Untuk pertama kalinya, sebelum digunakan untuk pemantauan dosis perorangan, TLD BARC harus dikalibrasi, terutama terhadap energi ¹³⁷Cs dan sumber radiasi lainnya. Kartu TLD yang akan dipelajari karakteristiknya di masukkan ke dalam *Badge*. Kemudian 4 TLD disusun dengan posisi tertentu, dan ditempelkan pada *central fantom* PMMA (berukuran 30 cm x 30 cm x 30 cm) dengan bantuan selotip. Posisi TLD pada fantom berada pada ketinggian 1m dari lantai, pada jarak 200 cm dari sumber ¹³⁷Cs, kemudian disinari dengan berbagai variasi dosis untuk membuat kurva respon/kalibrasi. Pada makalah ini, disajikan pengamatan terhadap kalibrasi TLD BARC yang dilakukan pada tahun 2014, 2015, dan 2016, yang disajikan pada Gambar 11, 12 dan 13.

TLD Reader TL1010S (Gambar 6) adalah semi otomatis, dipanaskan secara elektrik menggunakan *power supply* 220-230 V, 50 HZ,

dengan profil pemanasan linier. Metode pemanasan menggunakan gas nitrogen, dengan *clamping temperature* (300 \pm 2)^oC, dalam 10-12 detik menggunakan detector cahaya, dengan waktu pembacaan PMT 100 detik /badge. TLD Reader dapat digunakan untuk membaca TLD dengan rentang dosis dari (0,05 -2000) mSv. PC yang digunakan minimal 486 atau lebih tinggi, menggunakan system DOS atau MS Window 95/98/NT 6:20. Accuracy $\pm 30\%$ pada 1 mSv, dan $\pm 10\%$ di atas 10 mSv.

Pengecekan sensitivitas TLD harus dilakukan setelah 5X pembacaan (± 15 bulan), untuk memeriksa penurunan sensitivitas TLD, juga untuk memeriksa variasi sensitivitas antar *batch* yang berbeda. Untuk melakukan hal ini, sekurang-kurangnya 25 kartu diiradiasi dari setiap batch dengan dosis yang diketahui. Jika sensitivitas rata-rata dari setiap *batch* menurun > 15% dibandingkan dengan kartu acuan, maka *batch* tersebut ditarik dari layanan atau jika variasi dalam setiap *batch* $\geq 20\%$, maka seluruh *batch* harus dikeluarkan dari layanan. Atau semua kartu-kartu secara individu diuji, kemudian diberi dosis sama dan hanya kartu yang memberikan variasi sensitivitas dalam rentang 15% dipilih untuk pemakaian selanjutnya.

Tujuan Jaminan Mutu pada Pelaksanaan uji/kalibrasi adalah untuk memastikan kesesuaian *Standard Operating procedure* (SOP) ini dengan Panduan Induk [6], memastikan SOP ini dapat dilaksanakan (operasional), memeriksa kesesuaian rumusan SOP ini dengan pelaksanaannya, dan memastikan dengan perkembangan standar/peraturan perundang-undangan, kebutuhan terkini dalam kegiatan litbang/layanan.

SOP Teknis adalah prosedur standar yang sangat rinci dari kegiatan yang dilakukan oleh satu orang aparatur atau pelaksana dengan satu peran atau jabatan.

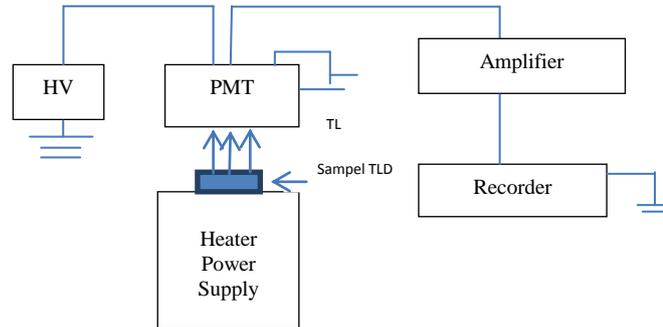
Berdasarkan SNI-ISO/IEC-17025:2008 [7] "Persyaratan umum untuk kompetensi laboratorium uji dan kalibrasi, bab 5.9 pada Jaminan Mutu Hasil Uji dan Kalibrasi" menghendaki: Laboratorium harus memiliki prosedur kontrol mutu untuk memonitor keabsahan hasil uji dan kalibrasi, data hasil uji/kalibrasi harus dicatat dan untuk mengkaji hasil harus digunakan teknik statistik. Pemonitoran ini harus direncanakan dan mengkaji hal-hal berikut :

- a. penggunaan bahan acuan tersertifikasi secara regular
- b. partisipasi dalam komparasi antar laboratorium
- c. uji replikasi/kalibrasi menggunakan metode yang sama/berbeda

- d. menguji/ mengkalibrasi kembali retained-item
- e. korelasi hasil untuk karakteristik item yang berbeda.

Banyak materi kristal yang dapat menunjukkan fenomena thermoluminisensi. Bila kristal diiradiasi selama beberapa menit, energy serap disimpan dalam materi kristal. Sebagian dari energy ini dapat direcover sebagai cahaya tampak jika materi ini dipanaskan. Fenomena

keluarnya foton tampak ini dikenal sebagai thermoluminisensi (TL). Skema diagram balok TLD Reader disajikan pada Gambar 1. Materi yang diiradiasi /diletakkan di dalam *heater-cup* /planset/magazine ketika dipanaskan untuk siklus pemanasan yang berulang. Cahaya yang dipanaskan diukur oleh tabung photomultiplier (PMT), yang mengkonversikan cahaya ke dalam arus listrik. Arus tersebut di amplifikasi dan diukur oleh *recorder* atau *counter*, dan dikonversikan kedalam satuan muatan (nC).



Gambar 1. Skema digram balok TLD Reader

Jaminan mutu adalah semua kegiatan yang direncanakan dan sistematis yang dibutuhkan untuk memberikan kepercayaan yang cukup bahwa suatu produk/jasa akan memenuhi persyaratan mutu yang ditetapkan [7].

Jaminan Mutu Pengukuran adalah proses untuk memastikan hasil pengukuran yang memadai, meliputi:

- penggunaan prinsip desain pengukuran yang baik sehingga seluruh proses pengukuran, komponen dan faktor pengaruh yang relevan dapat ditandai dipantau dan dikendalikan.
- karakterisasi pengukuran, meliputi ketidakpastian proses pengukuran, termasuk variasi statistik, kontribusi dari semua factor yang diketahui, atau faktor yang dicurigai dapat mempengaruhi, ketidakpastian tipe B dan ketidakpastian tipe A selama proses pengukuran.
- Secara kontinyu memantau kinerja dan melakukan kontrol statistik proses pengukuran dengan teknik pengendalian

proses statistik yang *proven*, meliputi pengecekan standar yang digunakan.

Peralatan yang diperlukan untuk melaksanakan jaminan mutu pengukuran sistem TLD BARC adalah :

- Pesawat Sinar-X YXLON/ MG-325 (Gambar 2)
- Detektor dan electrometer untuk mengukur output sumber radiasi ^{137}Cs dan sinar-X (Gambar 3)
- Sumber radiasi ^{137}Cs (OB-85) (Gambar 4)
- Meja kalibrasi, Phantom, Meteran, Laser alignment
- Sistem TLD Reader TL-1010S (Gambar 5)
- TLD BARC [CaSO₄:Dy] (Gambar 6)
- Oven
- Alat pengontrol ruangan : thermometer, hygrometer, barometer.
- Gas nitrogen kering



Gambar 2. Control Unit dan Pesawat Sinar-X / YXLON MG325



Gambar 3. Detektor Kamar Pengion dan electrometer PTW Unidose



Gambar 4. Sumber Radiasi ¹³⁷Cs (OB-85) untuk mengkalibrasi TLD



Gambar 5. TLD Reader BARC



Gambar 6. TLD BARC

Untuk memperoleh hasil bacaan TLD yang stabil, harus dilakukan pengecekan/pengujian terhadap TLD Reader BARC. Pada

Tabel 1 disajikan cara pengujian stabilitas TLD Reader BARC.

Tabel 1. Pengujian stabilitas TLD Reader BARC

No.	JENIS PENGUJIAN	METODE PENGUJIAN
1	<i>Light Leakage</i> (Kebocoran Cahaya)	Memeriksa bacaan kartu TLD BARC yang telah diannealing di ruangan yang terang dan di ruang gelap
2	EHT ke PMT	Setelah dipanaskan 30 menit, variasi EHT harus ≤ 1 V selama proses pembacaan
3	<i>Light Source (LS) Reading</i> (Pembacaan LS)	Pembacaan LS harus $\leq 5\%$ sepanjang hari
4	<i>Read out temperature</i> (suhu pembacaan)	<i>Clamping temperature</i> harus berkisar $(285 \pm 2)^\circ\text{C}$ dan harus dicapai dalam 50-60 detik dari mulai siklus pemanasan
5	<i>Glow Curve</i> /kurva pancar dan keseragaman pembacaan	Sinari 10 kartu TLD dengansinar gamma/beta dengan dosis 4-5 mSv. Lakukan pembacaan, dan keseragaman dapat dicek dengan mencatat 1 kurva pancar dan bandingkan strukturnya. Kurva pancar yang tajam akan menjamin kontak yang baik dan pemanasan yang sesuai dari TLD <i>disc</i> dengan <i>heater</i> .
6	<i>Residual TL Check</i> (Pengecekan Residu TL)	Dilakukan pembacaan TL yang kedua kali. Tidak boleh lebih dari 10-12% dari pembacaan pertama. Jika lebih, maka laju alirdan <i>air set point</i> harus diatur.
7.	<i>Reproducibility TL Read out</i> (Kedapat ulangan bacaan TL)	Sekurang-kurangnya 10 TLD Card yang telah diseleksi di- <i>annealing</i> , diirradiasi dan baca setelah satu hari. Variasi setiap siklus dari bacaan rerata TL harus dalam $\pm 10\%$, dan jika ada perubahan yg berarti, response harus ditetapkan. Minimum tiga siklus harus dilakukanyaitu : <i>annealing</i> , penyinaran dan pembacaan.
8	<i>Minimummeasurable dose</i> (Dosis minimum yg dapat diukur)	Lakukan pembacaan terhadap 10 kartu TLD yang sudah diannealing. Dosis minimum yang dapat diukur, diperoleh dari nilai dua sigma.
9	<i>Linearity test</i> (Uji linieritas)	Sinari 10 kartu TLD yang sudah diannealing (minimum 5 dosis dengan ¹³⁷ Cs, 5 kartu setiap dosis), dengan rentang dosis 0,3 -1 Sv, dan baca kartu TLD. Respon TL (TL/mSv) rata-rata harus dalam $\pm 10\%$ dalam rentang dosis tersebut.

Sebelum digunakan untuk pengukuran, semua peralatan yang akan digunakan untuk pengukuran harus terkalibrasi, baik peralatan utama maupun peralatan pendukung. Tujuannya agar hasil pengukuran tertelusur ke sistem internasional (SI) melalui sistem nasional.

Pengukuran output

Alat utama yang digunakan untuk pengukuran output pesawat OB-85(¹³⁷Cs) dan/

sinar-X adalah Ionization chamber 600 cc yang dikalibrasi di *Secondary Standard Dosimetry Laboratory* (SSDL)-IAEA setiap 5 tahun sekali. Selama antar waktu 5 tahun dilakukan cek stabilitas agar diketahui dalam rentang tersebut tidak ada perubahan yang berarti. Cek stabilitas alat dilakukan sebelum melakukan pengukuran. Kondisi suhu ruangan yang diperbolehkan dalam penggunaan pesawat OB-85/Pesawat Sinar-X adalah sampai dengan 40°C, kelembaban

(humidity) maksimum : 90% pada suhu 40°C, tekanan udara 700 – 1100 hPa.

Sebelum digunakan untuk penyinaran TLD, sumber radiasi (pesawat OB-85/pesawat

sinar-X) harus diketahui/ diukur *output*-nya. Untuk menghitung *output* atau laju kerma udara, K_a , pesawat OB-85/ pesawat sinar-X dapat digunakan persamaan (1) [8]:

$$K_a [\mu\text{Gy}/\text{menit}] = MxK_{PT}xN_k \dots\dots(1)$$

- N_k : Faktor kalibrasi ($\mu\text{Gy}/\text{nC}$)
- M : Bacaan alat standar (nC/menit)
- K_{PT} : Factor koreksi (tekanan dan suhu)

$$K_{PT} = \left[\frac{273,15 + T}{273,15 + T_o} \right] \left[\frac{P_o}{P} \right] \dots\dots(2)$$

- T : Suhu udara saat pengukuran
- T_o : suhu udara acuan (20°C)
- P : Tekanan udara saat pengukuran
- P_o : Tekanan udara acuan (1013,25 mBar)

$$Hp(10) [\mu\text{Sv}/\text{menit}] = h * K_a \dots\dots\dots (3)$$

- $Hp(10)$:Laju dosis ekuivalen perorangan [$\mu\text{Sv}/\text{menit}$]
- h :Factor konversi [Gy/Sv], bergantung energy, E, dan arah sudut datang radiasi.

Penyinaran /kalibrasi TLD

Kalibrasi adalah Prosedur untuk menetapkan hubungan kuantitatif antara respon instrumen dan kuantitas yang akan diukur [5].

Tujuan kalibrasi adalah untuk menentukan nilai faktor kalibrasi/respon alat ukur radiasi (AUR)/dosimeter dan menentukan dosis serap /dosis ekuivalen personal agar tertelusur ke standar nasional/internasional [6].

Setelah diperoleh output pesawat sinar-X/ output pesawat OB-85 (^{137}Cs) dalam satuan laju kerma udara, kemudian dikonversikan kedalam laju dosis ekuivalen personal, $Hp(10)$ menggunakan factor konversi sesuai dengan energy dan sudut radiasi . Gunakan factor konversi pada Tabel XVII /SRS-16/2000, untuk perhitungan tersebut.Gunakan persamaan (1 dan 2) untuk menghitung Laju dosis ekuivalen personal, $Hp(10)$.

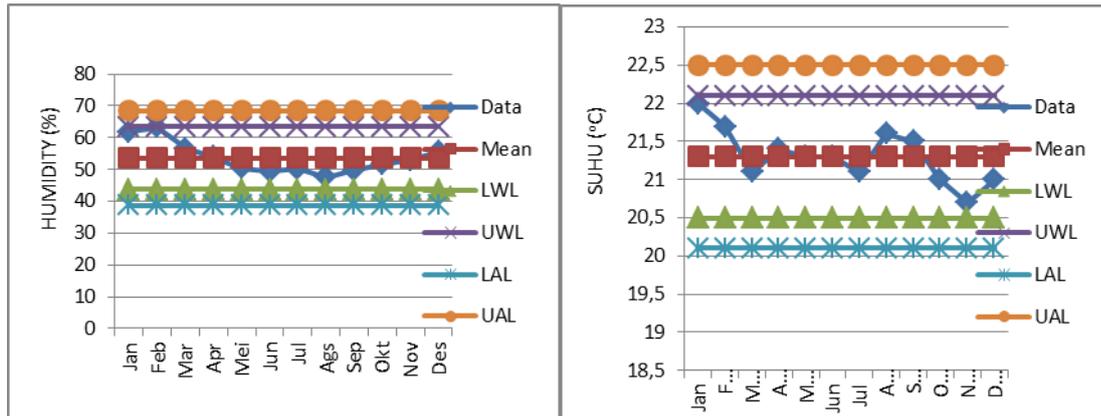
Alat standar dipindahkan dan diganti dengan phantom PMMA.TLD diletakkan pada central fantom, lurus dengan sumber ^{137}Cs /sinar-X. Setiap 4 TLD disinari dengan 1 dosis tertentu, kemudian lakukan hal yang sama untuk dosis yang lain. Setelah penyinaran, diamkan satu hari kemudian TLD yang sudah disinari dengan ^{137}Cs atau Sinar-X dibaca menggunakan TLD Reader TL1010S. Dilakukan plotting data hingga diperoleh kurva kalibrasi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

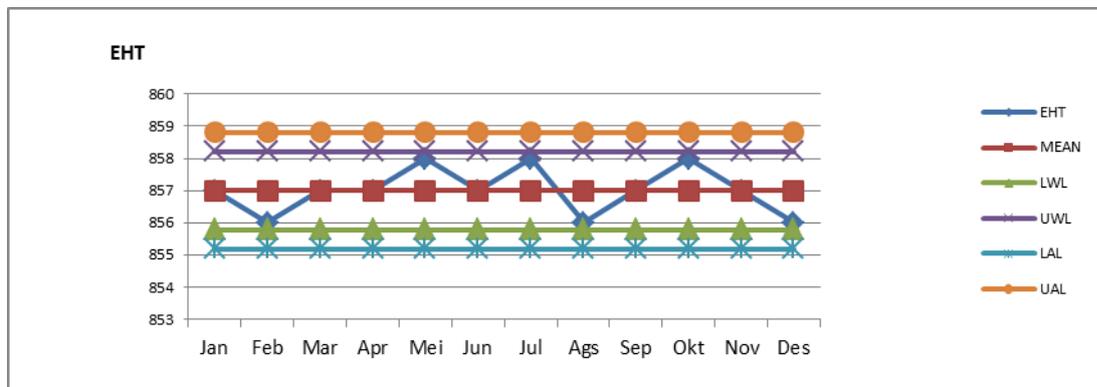
Untuk mendapatkan hasil bacaan TLD yang stabil, kondisi *humidity* dan suhu ruang TLD Reader harus dikontrol. Pada Gambar 2 disajikan kondisi *humidity* dan suhu di ruang TLD Reader. Kondisi *humidity* dan suhu ruang tersebut berada pada rentang *Lower Warning Level* (LWL) dan *Upper Warning Level* (UWL), artinya bahwa kondisi ruang TLD Reader cukup stabil. Apabila kondisi di ruang TLD Reader fluktuatif (melewati LWL dan UWL), maka akan mempengaruhi pembacaan TLD.

Untuk mendapatkan hasil bacaan TLD yang stabil, perlu dilakukan pengamatan terhadap kondisi EHT pada TLD-Reader.Pada Gambar 9 disajikan kondisi EHT pada TLD-Reader selama tahun 2015. Kondisi EHT pada TLD-Reader tersebut berada pada rentang *Lower Warning Level* (LWL) dan *Upper Warning Level* (UWL), artinya bahwa kondisi TLD-Reader cukup stabil. Apabila kondisi EHT tidak stabil/fluktuatif, dapat menyebabkan bacaan TLD fluktuatif.

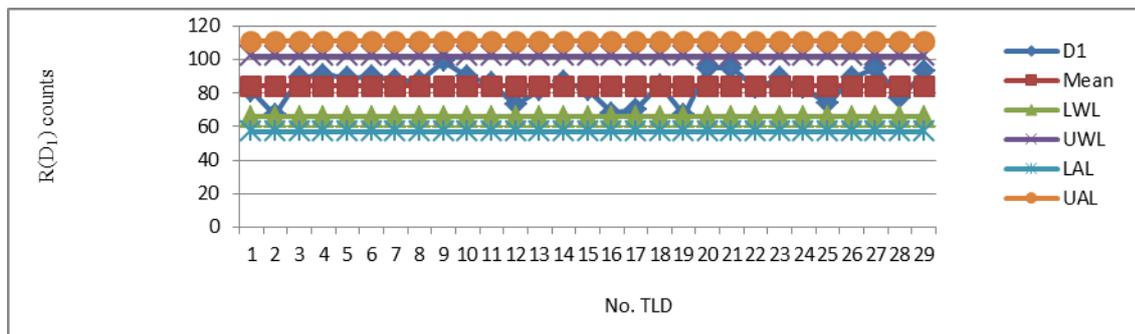
Pada Gambar 10 disajikan pengamatan keseragaman terhadap 30 TLD BARC baru, untuk elemen D_1 . Keseragaman TLD ini berada pada rentang antara *Lower Warning Level* dan *Upper Warning Level*, artinya bahwa TLD BARC cukup seragam.pada pengamatan ini, ketidakpastian keseragaman : 3 % (1σ).



Gambar 8. Humidity dan suhu pada ruang baca TLD BARC 2015



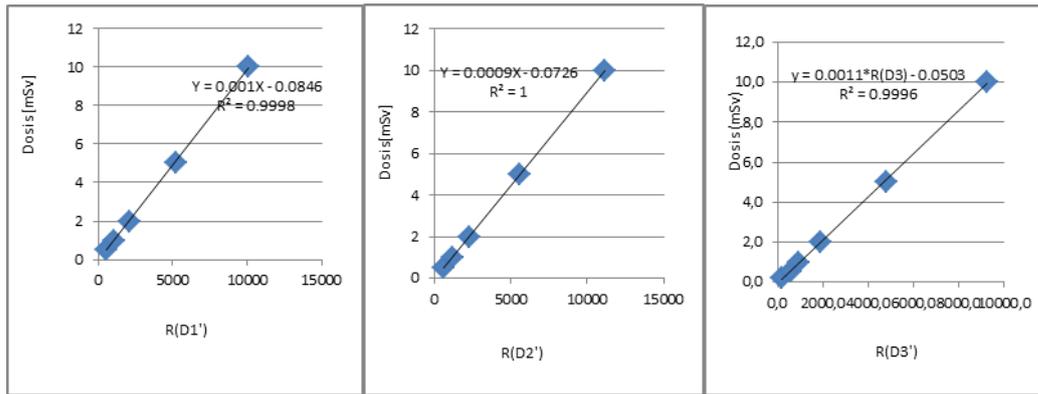
Gambar 9. Kondisi EHT pada TLD Reader selama tahun 2015



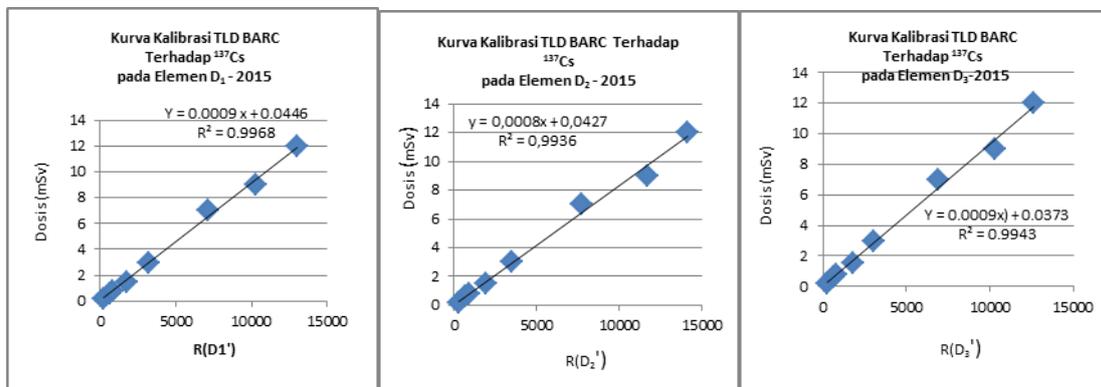
Gambar 10. Uji Keseragaman TLD BARC pada elemen D₁

Setiap tahun dilakukan kalibrasi terhadap system TLD BARC. Tujuannya adalah untuk memantau apakah TLD BARC masih layak pakai. Pada makalah ini dilakukan pengamatan pada kurva kalibrasi TLD BARC tahun 2014, 2015, dan 2016. Kurva kalibrasi system TLD

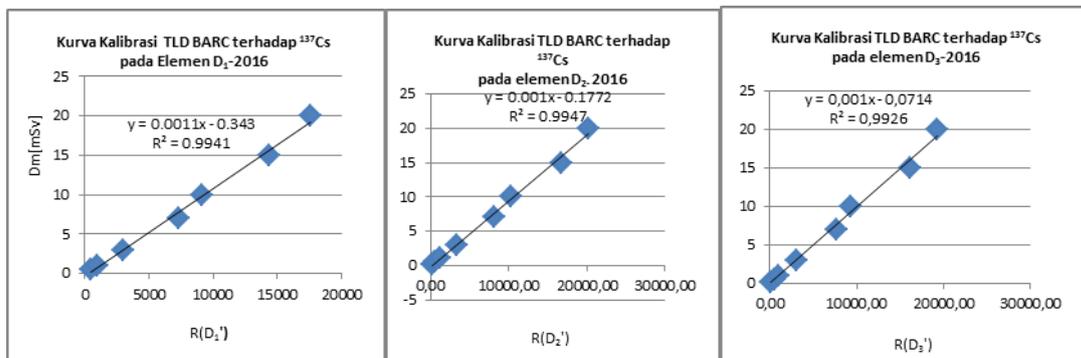
BARC tahun 2014 disajikan pada Gambar 11, Kurva kalibrasi system TLD BARC tahun 2015 disajikan pada Gambar 12 dan Kurva kalibrasi system TLD BARC tahun 2016 disajikan pada Gambar 13.



Gambar 11. Kurva Kalibrasi TLD BARC terhadap ¹³⁷Cs tahun 2014, pada elemen D₁, D₂, dan D₃



Gambar 12. Kurva Kalibrasi TLD BARC terhadap ¹³⁷Cs tahun 2015 pada elemen D₁, D₂, dan D₃



Gambar 13. Kurva Kalibrasi TLD BARC terhadap ¹³⁷Cs tahun 2016 pada elemen D₁, D₂, dan D₃

Jika TLD BARC digunakan untuk memonitor radiasi yang diterima pekerja radiasi selama periode 3 bulan, dan mendapatkan respon, pada R(D₁) sebesar 3000 nC, maka apabila dievaluasi dengan kurva kalibrasi tahun 2014, 2015 dan

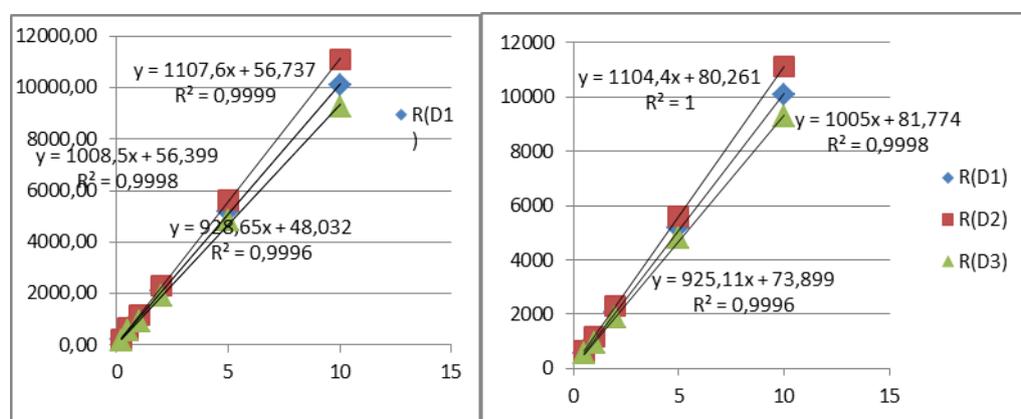
2016, pekerja radiasi akan menerima dosis seperti pada Tabel 2. Perbedaan dosis yang diterima masih dalam rentang ±20%, artinya bahwa TLD BARC masih cukup stabil dalam rentang 3 tahun.

Tabel 2. Dosis yang diterima pada elemen D₁, jika TLD dievaluasi dengan kurva kalibrasi 2014, 2015 dan 2016.

Keterangan	R(D ₁)	Dosis [mSv]		
		2014	2015	2016
	3000	2,92	2,74	2,96
D _m (tahun)/D _m (2014)		1	0,94	1,01

Pada Gambar 14 disajikan kurva respon TLD BARC terhadap ¹³⁷Cs untuk tahun 2014 dan tahun 2016. Terlihat bahwa respon TLD cukup stabil untuk masing-masing elemen. Jika TLD mendapatkan dosis 3 mSv, maka masing-masing elemen akan memberikan respon pada Tabel 3.

Jika respon TLD tahun 2016 dibandingkan respon TLD 2014, akan diperoleh hasil pada Tabel 3, baris 4. Respon TLD cukup stabil, karena perbandingan respon TLD di tahun 2016 dibandingkan di tahun 2014 masih berada pada rentang ± 20%.



Gambar 14. Kurva Respon TLD BARC tahun 2014 dan 2016 terhadap ¹³⁷Cs pada elemen D₁, D₂, dan D₃

Tabel 3. Respon TLD pada elemen R(D₁), R(D₂) dan R(D₃)

Tahun	Dosis 3 mSv		
	R(D ₁)	R(D ₂)	R(D ₃)
2014	3082	3380	2834
2016	3393	3097	2849
2016/2014	1,10	0,92	1,01

Jaminan mutu eksternal dibuktikan dari hasil interkomparasi audit mutu dosis TLD BARC tahun 2014 dan 2015, disajikan pada Tabel 4. Berdasarkan Laporan Audit Mutu Dosis,

dikatakan bahwa hasil interkomparasi dapat diterima didasarkan pada pedoman IAEA “*Assessment of Occupational Exposure due to External Sources of Radiation (RSG-1.3, 1999)*.”

Tabel 4. Hasil Interkomparasi audit mutu dosis TLD BARC tahun 2014 – 2015

Keterangan	2014						2015			
	X-Ray (100 kV)			¹³⁷ Cs			¹³⁷ Cs		X-ray (100kV)	
Hp(10) [mSv]	0,5	4,0	12	0,22	0,9	1,4	1,5	5,0	1,5	5,0
Peserta/LDSS	1,37	1,10	1,02	0,73	1,00	0,93	0,98	0,9	1,01	0,80
Upper Level	1,83	1,57	1,52	1,93	1,73	1,66	1,67	1,56	1,67	1,56
Lower Level	0,28	0,6	0,64	0,13	0,42	0,51	0,5	0,62	0,5	0,62

KESIMPULAN

PTKMR-BATAN telah menerapkan jaminan mutu pada sistem evaluasi dosis perorangan menggunakan TLD BARC, baik internal maupun eksternal. Jaminan mutu internal diterapkan dengan:

- pengkondisian ruang TLD Reader,
- pengamatan terhadap kondisi TLD Reader,
- pengamatan terhadap TLD yang akan dikirim ke pelanggan
- pengamatan terhadap kurva kalibrasi TLD
- Kondisi ruang TLD Reader (*humidity* dan suhu) berada pada rentang *Lower Warning Level* (LWL) dan *Upper Warning level* (UWL), artinya bahwa kondisi ruang TLD Reader cukup stabil.
- Kondisi EHT pada TLD-Reader berada pada rentang *Lower Warning Level* (LWL) dan *Upper Warning Level* (UWL), artinya bahwa kondisi TLD Reader cukup stabil.
- Pengamatan Keseragaman terhadap 30 TLD baru, berada pada rentang *Lower Warning Level* dan *Upper Warning Level*, artinya bahwa TLD BARC cukup seragam, dengan ketidakpastian 3 % (1σ).

Persamaan kurva kalibrasi tahun 2014, 2015 dan 2016, cukup stabil. Perbedaan hasil evaluasi dosis menggunakan ke tiga kurva tersebut masih dalam rentang $\pm 10\%$.

Jaminan mutu eksternal dibuktikan dengan mengikuti program interkomparasi /audit mutu dosis yang diselenggarakan oleh Laboratorium Dosimetri Standar Sekunder (LDSS). Hasilnya masih dalam rentang keberterimaan berdasarkan pedoman IAEA “ *Assessment of Occupational Exposure due to External Sources of Radiation* (RSG-1.3, 1999).

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PTKMR-BATAN, khususnya rekan-rekan di

Subbidang Keselamatan Kerja dan Proteksi radiasi (KKPR) dan Subbidang Kalibrasi Alat Ukur Radiasi (AUR) yang telah berpartisipasi dalam kegiatan kalibrasi TLD BARC dan interkomparasi audit mutu dosis dengan TLD BARC.

DAFTAR PUSTAKA

1. *Radiation Protection Rule* (RPR - 71), 1971.
2. Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir No. 4/2013 tentang Proteksi dan Keselamatan Radiasi dalam Pemanfaatan Tenaga Nuklir.
3. *ICRP (1990), Recommendations of the International Commission on Radiological Protection* (ICRP-60), Pergamon Press, Oxford, 1990.
4. *Quality assurance*, wikipedia
5. AS Pradhan, MM, Adhoni, G. varadharajan, AK Bakshi, *Handbook on the use of TLD Badge on CaSO₄:Dy Teflon TLD Disc for individual Monitoring*, Bhabha Atomic Research Centre, India, 2002.
6. SNI-ISO/IEC-17025:2008, *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*.
7. Panduan Induk PTKMR, SOP 001.001/OT 01 01/KMR/2015.
8. IAEA-Safety Standards Series, *Assessment of Occupational Exposure Due to External Sources of Radiation*, Safety Guide No. RS-G-1.3, Vienna, 1999.
9. Safety Report Series No.16/2000. *Calibration of Radiation Protection Monitoring instruments*, IAEA, Vienna, 2000.

PERANCANGAN SISTEM KENDALI VAC OFF-GAS PADA INSTALASI PENGOLAHAN LIMBAH RADIOAKTIF BERBASIS PROGRAMABLE LOGIC CONTROL

Sugianto, Budiyo, Arifin Istavara

Pusat Teknologi Limbah Radioaktif-Badan Tenaga Nuklir Nasional
Kawasan Puspipstek Serpong Gedung 50, Tangerang Selatan, Banten 15310
E-mail : gianto68@batan.go.id

ABSTRAK

PERANCANGAN SISTEM KENDALI VAC OFF-GAS PADA INSTALASI PENGOLAHAN LIMBAH RADIOAKTIF BERBASIS PROGRAMABLE LOGIC CONTROL. Sistem *Ventilation and Air Conditioning* di Instalasi Pengolahan Limbah Radioaktif (IPLR) berfungsi untuk menjaga ruang pada keadaan hampa parsial terhadap tekanan udara luar, membatasi kemungkinan adanya kontaminasi, dan pengolahan udara sebelum keluar melalui cerobong. Ketika beroperasi, sistem *VAC Off-Gas* menggunakan kendali *on-off* relai. Pengukuran parameter operasi dilakukan secara berkala menggunakan alat ukur *portable*. Kendali dan pengukuran parameter operasi kurang efektif sehingga perlu diubah ke teknologi yang lebih baru. Perubahan sistem kontrol dari kendali *on-off* ke kendali berbasis *Programmable Logic Control* (PLC) menjadi solusi yang menarik. Untuk itu perlu dilakukan perancangan sistem kendali *VAC Off-Gas* IPLR yang berbasis PLC. Metode dilakukan dengan identifikasi komponen kendali yang terpasang, inventarisasi komponen penggantian membuat diagram kerja sistem yang akan diaplikasikan. Kegiatan perancangan menghasilkan bahwasistem kendali *VAC Off-Gas* IPLR membutuhkan komponen CPU 1515-2 PN sebanyak 1 buah. *Interface modul* IM 155-5 PN ET 200MP sebanyak 1 buah. Catu daya PM 1507 24 V/8 A sebanyak 2 buah. *Digital Input Module* DI 32 X DC 24 V, 32 Channels in Groups of 16 sebanyak 2 buah. *Digital Output Module* DO 32 X 24 VDC/0.5 A; 32 Channels in Groups of 8 sebanyak 2 buah. *Analog Input Module* AI 8 X sebanyak 4 buah. Komponen *software* S 7.300 dan *Win CC Flexible 2008 Runtime*. Operasi kendali *on-off* dikoneksikan ke CPU melalui perangkat *input/output* di ruang kontrol sedangkan pemantauan informasi kinerja alat dan pengukuran parameter operasi dikoneksikan ke *interface modul* melalui perangkat *input/output*.

Kata Kunci : Kendali, pemantauan, *VAC Off-gas*, *programmable logic control*, IPLR

ABSTRACT

DESIGN OF VAC OFF-GAS CONTROL SYSTEM AT THE RADIOACTIVE WASTE INSTALLATION BASED ON PROGRAMABLE LOGIC CONTROL. *Ventilation and Air Conditioning Systems in the Radioactive Waste Installation (RWI) serves to keep the room at a state of partial vacuum to the outside air pressure, limit the possibility of contamination, and air treatment before existing through the chimney. When operating, VAC Off-Gas system using the controls on-off relay. Measurement of operating parameters is done periodically using portable measuring instrument. Control and monitoring is less effective that need to be changed to a newer technology. Change control system of on-off control to the control-based Programmable Logic Control (PLC) becomes an attractive solution. To begin with, it should be made the design of VAC control system based PLC. Method done by identifying and inventory needs and make the system work diagram will be applied. Control system design of VAC Off-Gas IPLR need 1515-2 PN CPU components number as 1 piece. Interface Modules IM 155-5PN ET 200MP number as 1 piece. PM 1507 Power supply 24 V / 8 A number as 2 pieces. Digital Input Module DI 32 x DC 24 V, 32 Channels in Groups of 16 number as 2 pieces. Digital Output Module DO 32 x 24 VDC / 0.5 A; 32 Channels in Groups of 8 number as 2 pieces. Analog Input Module AI 8 X 4 units. Software components are S 7300 and Win CC Flexible 2008 Runtime. On-off control operation connected to the CPU through the input / output devices in the control room while monitoring performance information and measurement instrument operating parameters to the interface module connected via input / output devices*

Keywords: control, monitoring, *VAC Off-gas*, *programmable logic control*, RWI

PENDAHULUAN

Instalasi Pengolahan Limbah Radioaktif (IPLR) dalam operasinya dilengkapi dengan sistem *VAC-Off gas*. Sistem *VAC* berfungsi untuk menjaga agar ruangan IPLR berada pada keadaan hampa parsial terhadap tekanan udara luar (*negative pressure*), membatasi kemungkinan adanya kontaminasi di dalam ruang dengan cara menghembuskan udara

segar, dan pengolahan serta evakuasi udara yang keluar dari IPLR. Peranan sistem gas buang adalah untuk menjamin kumpulan dan perlakuan terhadap aliran gas-gas yang aktif atau diragukan yang dihasilkan oleh perlengkapan yang menyusun penghalang penyimpan pertama untuk bahan-bahan aktif [1]. Dengan sistem ini udara akan mengalir dari daerah yang bertekanan tinggi (zona 1) menuju ke daerah

bertekanan paling rendah (zona 4). Bila terjadi kasus kontaminasi di zona 4, maka zat radioaktif tidak akan menyebar ke daerah lain yang ditempati pekerja. Yang perlu diperhatikan adalah kondisi ketika sistem VAC dan *Off-gas* tidak beroperasi. Kondisi ini akan menyebabkan tidak adanya tekanan hampa parsial, sehingga jika terjadi kontaminasi udara di dalam ruangan, maka udara tersebut tidak bisa diolah dan dievakuasi.

Di IPLR, sistem VAC pada dasarnya dibagi menjadi 3 sub sistem. Sub sistem 1 bertugas menghembuskan udara segar langsung ke dalam ruangan-ruangan daerah 1 dan ruangan-ruangan tertentu di daerah 2 dan 3. Suplai udara dijamin oleh dua buah *blower fan*, masing masing memberikan setengah aliran udara guna memenuhi suplai udara minimal 50%. Tidak ada suplai udara langsung ke dalam daerah 4, untuk meniadakan bahaya kecelakaan karena tekanan lebih di dalam ruangan. Subsistem ke 2 untuk membatasi aliran, udara dialirkan dari suatu daerah ke daerah berikutnya yang mempunyai tingkat kontaminasi yang lebih tinggi. Tidak ada aliran udara ke dalam daerah dimana sedang terjadi kebakaran. Subsistem ketiga adalah Penghisapan udara. Ada dua sistem penghisapan udara yang terpisah, masing-masing sistem mempunyai terminal tempat penyaringan dan fan penghisap. Sistem penghisapan untuk daerah 2 dan 3 dilayani oleh dua buah fan penghisap yang masing-masing bekerja 50%. Sistem ini juga menangani sistem gas buang dari mesin cuci, *compacting press* dan meja getar setelah melewati penyaringan udara tahap 1. Tidak ada penghisapan udara secara langsung dari daerah 1. Sistem penghisapan untuk daerah 4 dilayani oleh dua buah fan yang bekerja 100%. Untuk membatasi kontaminasi di dalam sistem penghisap daerah 4, disediakan penyaring HEPA pada *outlet sel druming*[1,2].

TEORI

Programmable Logic Controller (PLC) adalah komputer elektronik yang mudah digunakan yang memiliki fungsi kendali untuk berbagai tipe dan tingkat kesulitan yang beraneka ragam. Definisi *Programmable Logic Controller* adalah suatu sistem elektronik yang beroperasi secara digital dan didisain untuk pemakaian di lingkungan industri. Sistem ini menggunakan memori yang dapat diprogram untuk menyimpan secara internal instruksi-instruksi yang mengimplementasikan fungsi-fungsi spesifik seperti logika, urutan, perwaktuan, pencacahan dan operasi aritmatik untuk mengontrol mesin atau proses melalui modul-modul I/O digital maupun analog.

Selama ini, kendali *VAC Off-Gas* menggunakan kendali *on-off* relai. Pengoperasian sistem tata udara delapan jam setiap hari kerja dari panel kontrol ruang kendali. Pengukuran parameter data operasi dilakukan secara berkala menggunakan alat ukur *portable* keruangan-ruangan yang dipantau. Parameter yang dipantau adalah temperature, kelembaban, tekanan *negative* ruangan dan *pressure drop* HEPA-filter. Kondisi peralatan yang sedang beroperasi dan parameter operasi tidak termonitor secara *online*. Data operasi dicatat dan disimpan secara manual. Kondisi peralatan yang sedang beroperasi dipantau satu persatu dilapangan. Kerja menjadi kurang efektif sehingga perlu perbaikan sistem kontrol dan monitor. Perubahan sistem kontrol dari kendali *on-off* ke kendali berbasis *Programmable Logic Control* (PLC) menjadi solusi yang menarik. Dengan kendali PLC Sistem *VAC Off-gas* dapat dioperasikan dari ruang kendali dan dipantau kinerjanya karena disediakan monitor operasi dan bahkan disediakan beberapa *ekspand* keruang lain. Pemantauan parameter proses tidak lagi datang ke ruang-ruang tapi cukup dipantau dari monitor di ruang kendali. Untuk mengawalinya perlu dibuat rancangan sistem kendali VAC berbasis PLC untuk mengidentifikasi dan menginventarisasi kebutuhan serta membuat diagram kerja dari sistem yang akan diaplikasikan.

Makalah ini membahas tentang perancangan sistem kendali VAC Off-Gas yang berbasis PLC untuk menggantikan kendali *on off* relai dengan tahapan kegiatan identifikasi dan inventarisasi komponen kontrol dan pemantauan, perancangan kontrol dan pemantauan parameter operasi serta penentuan spesifikasi bahan.

PLC ini dirancang untuk menggantikan suatu rangkaian relai sekuensial dalam suatu sistem kontrol. Selain dapat diprogram, alat ini juga dapat dikendalikan, dan dioperasikan oleh orang yang tidak memiliki pengetahuan di bidang pengoperasian komputer secara khusus. PLC ini memiliki bahasa pemrograman yang mudah dipahami dan dapat dioperasikan bila program yang telah dibuat dengan menggunakan perangkat lunak yang sesuai dengan jenis PLC yang digunakan sudah dimasukkan. Alat ini bekerja berdasarkan input-input yang ada dan tergantung dari keadaan pada suatu waktu tertentu yang kemudian akan meng-*On* atau meng-*Off* kan *output*. Kondisi 1 menunjukkan bahwa keadaan yang diharapkan terpenuhi, sedangkan kondisi 0 berarti keadaan yang diharapkan tidak terpenuhi. PLC juga dapat

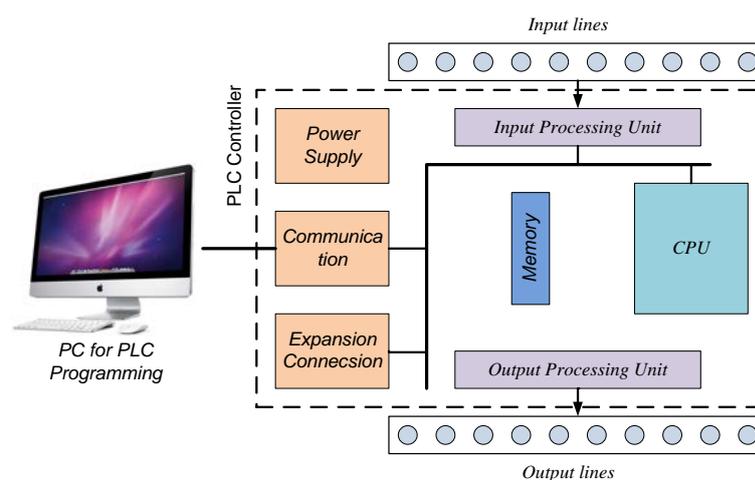
diterapkan untuk pengendalian sistem yang memiliki output banyak.

Pada dasarnya sinyal yang diterima/dibangkitkan oleh unit *input/output* PLC berupa sinyal digital, yang bernilai biner 0 atau 1. Perangkat *input/output* yang memiliki sinyal analog memerlukan piranti ADC (*Analog to Digital Converter*) atau DAC (*Digital to Analog Converter*) agar dapat dihubungkan ke PLC. Biasanya piranti ini terdapat dalam modul analog yang diproduksi pabrik pembuat PLC. Sinyal analog yang biasanya digunakan dalam PLC mengikuti standar industri, yaitu arus 4 – 20 mA untuk tegangan *input* digital bermacam-macam mulai dari 5 V DC, 12 V DC atau 24 V DC, sedangkan terminal *output* dapat berupa *relay* atau transistor.

PLC yang awalnya berfungsi menggantikan peran *relay*, dapat diartikan sesuai kata penyusunnya adalah sebagai berikut :*Programmable* yaitu menunjukkan kemampuannya yang dapat dengan mudah diubah-ubah sesuai program yang dibuat dan kemampuannya dalam hal memori program yang telah dibuat. *Logic* yaitu menunjukkan kemampuannya dalam memproses *input* secara aritmatik/*Arithmetic Logical Unit*(ALU) dengan melakukan proses membandingkan, menjumlahkan, mengkalikan, membagi, dan mengurangi. *Controller* yaitu menunjukkan kemampuannya dalam mengontrol dan mengatur proses sehingga menghasilkan *output* yang diinginkan.

Komponen-komponen PLC terdiri atas *Central Processing Unit* (CPU), *input*, *output*, *memory*, fasilitas komunikasi, fasilitas ekstensi dan catu daya. CPU (*Central Processing Unit*),

yaitu otak dari PLC yang mengerjakan berbagai operasi, antara lain mengeksekusi program, menyimpan dan mengambil data dari memori, membaca kondisi/nilai *input* serta mengatur nilai *output*, memeriksa adanya kerusakan (*self - diagnosis*), serta melakukan komunikasi dengan perangkat lain. *Input*, merupakan bagian PLC yang berhubungan dengan perangkat luar yang memberikan masukan kepada CPU. Perangkat luar *input* dapat berupa tombol, *switch*, sensor atau piranti lain. *Output*, merupakan bagian PLC yang berhubungan dengan perangkat luar yang memberikan keluaran dari CPU. Perangkat luar *output* dapat berupa lampu, katub (*valve*), motor dan perangkat – perangkat lain. Memori, yaitu tempat untuk menyimpan program dan data yang akan dijalankan dan diolah oleh CPU. Dalam pembahasan PLC, memori sering disebut sebagai *file*. Dalam PLC memori terdiri atas memori program untuk menyimpan program yang akan dieksekusi, memori data untuk menyimpan nilai-nilai hasil operasi CPU, nilai *timer* dan *counter*, serta memori yang menyimpan nilai kondisi *input* dan *output*. Kebanyakan PLC sekarang memiliki satuan memori dalam *word* (16 bit). Fasilitas komunikasi, yang membantu CPU dalam melakukan pertukaran data dengan perangkat lain, termasuk juga berkomunikasi dengan komputer untuk melakukan pemrograman dan pemantauan. Fasilitas ekstensi, untuk menghubungkan modul PLC dengan modul pengembangan *input/output* sehingga jumlah terminal I/O dapat ditingkatkan. Catu daya, untuk memberikan sumber tegangan kepada semua komponen dalam PLC. Biasanya sumber tegangan PLC adalah 220 V AC atau 24 V DC[4].



Gambar 1. Diagram komponen PLC

HMI (*Human Machine Interface*) adalah sistem yang menghubungkan antara manusia dan teknologi mesin. Sistem HMI bekerja secara online dan *real time* dengan membaca data yang

dikirimkan melalui I/O *port* yang digunakan oleh sistem *controller*-nya. *Port* yang biasa digunakan untuk *controller* dan akan dibaca oleh HMI adalah *port com*, *port USB*, *port RS232* dan ada

pula yang menggunakan port serial. Tugas dari HMI adalah membuat visualisasi dari teknologi atau sistem secara nyata. Sehingga dengan desain HMI dapat disesuaikan dan memudahkan pekerjaan fisik. Tujuan dari HMI adalah untuk meningkatkan interaksi antara mesin dan operator melalui tampilan layar komputer dan memenuhi kebutuhan pengguna terhadap informasi sistem.

HMI berupa suatu tampilan GUI (*Graphic User Interface*) pada suatu tampilan layar komputer yang akan dihadapi oleh operator mesin maupun pengguna yang membutuhkan data kerja mesin. HMI terdapat berbagai macam visualisasi untuk monitoring kondisi mesin yang terhubung secara *online* dan *real time*. HMI akan memberikan suatu gambaran kondisi mesin berupa bagian mesin mana yang sedang bekerja. Pada HMI juga terdapat visualisasi pengendali mesin berupa tombol, *slider*, dan sebagainya yang dapat difungsikan untuk mengendalikan mesin sebagaimana mestinya. Selain itu HMI juga menampilkan *alarm* jika terjadi kondisi bahaya dalam sistem. Sebagai tambahan, HMI juga menampilkan data-data rangkuman kerja mesin termasuk secara grafik.

METODOLOGI

Komponen-komponen kendali *on-off* relai sistem VAC *Off-Gas* diidentifikasi dan diinventarisasi untuk tujuan penggantian komponen kendali berbasis PLC. Motor fan dan motor pompa diidentifikasi sebagai komponen yang akan dikendalikan. Parameter-parameter operasi VAC diidentifikasi sebagai komponen yang dipantau atau dimonitor. Kendali *On-Off* relai dari panel kontrol yang selama ini menghidup-matikan motor fan dan motor pompa digantikan fungsinya dengan PLC. Saluran *input-output* dihitung untuk menentukan jumlah dan model *digital input*, *digital output*, dan *analog input*-nya. Parameter operasi diidentifikasi selain untuk menentukan jumlah saluran analog input juga untuk menentukan jumlah dan model *transmitter* yang akan digunakan.

Inventarisasi kebutuhan komponen PLC dilakukan berdasarkan hasil identifikasi kendali *on/off* relai. Jumlah dan model *digital input* ditentukan berdasarkan jumlah sinyal informasi kinerja motor *exhaust fan*, motor *blower fan*, pompa *scrubbing*, pompa *chiller* dan mesin *chiller*. Jumlah dan model *digital output* ditentukan berdasarkan kendali *on-off* yang diberikan pada motor *exhaust fan*, motor *blower fan*, dan pompa *scrubbing*. Jumlah dan model *analog input* ditentukan berdasarkan parameter

operasi tekanan, suhu, kelembaban, dan kecepatan aliran yang akan diukur. *CPU*, *interface modul*, *power supply* dan *accessories* ditentukan berdasarkan kapasitas kendali yang dibutuhkan.

Skema diagram PLC dibuat untuk pemetaan sistem yang akan diaplikasikan. Model dan jumlah kabel, konektor dan *accessories* yang lain dihitung berdasarkan hasil pemetaan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Komponen sistem VAC yang selama ini dikendalikan secara *on-off* dari panel kontrol adalah motor *blower fan*, motor *exhaust fan*, pompa *scrubbing* dan *air handling unit*. Informasi kinerja komponen diindikasikan dengan lampu indikator. Parameter operasi diukur secara langsung *in-situ* dengan alat *portable* di lokasi. Jumlah komponen yang akan dikendalikan, jumlah informasi kinerja alat yang diperlukan dan jumlah parameter operasi yang dibutuhkan diidentifikasi untuk menentukan jumlah dan model komponen PLC. Daftar hasil identifikasi kendali *On-Off* relai yang diaplikasikan pada sistem VAC ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1 menunjukkan bahwa jumlah kendali *on-off* relai sistem lama sebanyak 26 buah terdiri atas kendali *On* dan kendali *Off* yang masing-masing 13 buah. Untuk kendali PLC, kendali *On* dan *Off* yang semula terpisah digabung menjadi satu kendali sehingga tinggal 13 buah yang dikoneksikan kedalam *digital output*. Displai informasi kinerja alat dan parameter operasi yang awalnya sebanyak 45 buah dipecah menjadi dua. Displai informasi kinerja alat dikoneksikan ke *digital input* sebanyak 21 buah, sedangkan parameter operasi dikoneksikan ke *analog input* sebanyak 24 buah. Hasil identifikasi kendali sistem VAC digunakan untuk menentukan model PLC yang akan diaplikasikan dan inventarisasi komponen yang dibutuhkan. Hasil inventarisasi spesifikasi *hardware* PLC untuk sistem kendali VAC *Off-Gas* IPLR ditunjukkan pada Tabel 2. Tabel 2 menunjukkan bahwa jumlah komponen *digital input* yang dibutuhkan adalah 2 buah yang masing-masing memiliki 16 saluran. Jumlah tersebut cukup untuk koneksi displai informasi kinerja alat yang hanya 21 buah sehingga masih tersisa 11 saluran sebagai cadangan. Jumlah *digital output* ditentukan sebanyak 2 buah dengan masing-masing memiliki 8 saluran. Jumlah tersebut cukup untuk koneksi 13 buah kendali *On-Off* dan masih tersisa 3 saluran cadangan. Jumlah *analog input* ditentukan 4 buah dengan spesifikasi 8 saluran *input*. Jumlah tersebut cukup untuk koneksi dari 24 buah informasi parameter proses yang diukur dan

masih tersisa 8 saluran sebagai cadangan. Jumlah *power supply* ditentukan 2 buah dimana 1 buah untuk CPU dan lainnya untuk *interface modul*. Dalam rancangan ini menggunakan *interface modul* karena letak antara ruang proses dengan ruang kendali berjauhan. CPU menggunakan

Simatic S7-1500, CPU 1515-2 PN dengan fasilitas koneksi *ethernet* sehingga dapat dikembangkan ke teknologi *scada*. Seluruh *transmitter* memiliki keluaran arus 4 – 20 ampere agar dapat dikoneksikan langsung ke PLC.

Tabel 1. Hasil identifikasi kendali *On-Off* relai

No	Nama komponen/ parameter sistem yang dikendalikan	Kendali (<i>existing</i>)		Kebutuhan untuk PLC		
		<i>On/ Off relay</i>	<i>Display</i>	<i>Digital output (channel)</i>	<i>Digital input (channel)</i>	<i>Analog input (channel)</i>
1	Motor <i>blower fan</i> 5101 A	2	1	1	1	
2	Motor <i>blower fan</i> 5101 B	2	1	1	1	
3	Motor <i>exhaust fan</i> 5102 A	2	1	1	1	
4	Motor <i>exhaust fan</i> 5102 B	2	1	1	1	
5	Motor <i>exhaust fan</i> 5103 A	2	1	1	1	
6	Motor <i>exhaust fan</i> 5103 B	2	1	1	1	
7	Motor <i>exhaust fan</i> 5201 A	2	1	1	1	
8	Motor <i>exhaust fan</i> 5201 B	2	1	1	1	
9	Pompa <i>scrubbing</i> A	2	1	1	1	
10	Pompa <i>scrubbing</i> A	2	1	1	1	
11	<i>Chiller</i> 1 dan pompa 1		2		2	
12	<i>Chiller</i> 2 dan pompa 2		2		2	
13	<i>Chiller</i> 3 dan pompa 3		2		2	
14	<i>Chiller</i> 4 dan pompa 4		2		2	
15	Motor <i>blower fan</i> 51013	2	1	1	1	
16	Motor <i>blower fan</i> 51014	2	1	1	1	
17	<i>Air Handling Unit office</i>	2	1	1	1	
18	Suhu, kelembaban, dan tekanan ruang 2.0.13		3			3
19	Suhu, kelembaban, dan tekanan ruang 3.0.01		3			3
20	Tekanan ruang 3.0.04		1			1
21	Tekanan ruang 4.0.01		1			1
22	Suhu, kelembaban, dan tekanan ruang 4.B.01		3			3
23	Tekanan ruang 2.0.06		1			1
24	Suhu ruang AHU		1			1
25	Tekanan filtrasi zona 2 dan 3		1			1
26	Tekanan filtrasi zona 4		1			1
27	Tekanan filtrasi OFF-Gas		1			1
28	Kecepatan aliran zona 2 dan 3		1			1
29	Kecepatan aliran zona 4		1			1
30	Kecepatan aliran Off-Gas		1			1
31	Suhu <i>input output</i> air chiller		2			2
32	Suhu, kelembaban, dan tekanan ruang 2.0.10		3			3
Jumlah		26	45	13	21	24

PLC yang akan digunakan adalah PLC Siemens S7-1500, karena PLC jenis ini memiliki kelebihan pada pengalamatannya. Alamat Input pada PLC dimulai dari alamat I0.0 sampai I65535.7. Akan tetapi pada PLC Siemens S7-

1500, alamat yang berhubungan langsung dengan peripheral dimulai dari I124.0 sampai I124.7 dan I125.0 sampai dengan I125.1. Alamat-alamat yang tidak berhubungan dengan *peripheral* tersebut dapat digunakan sebagai alamat

perantara. Alamat *output* pada PLC Siemens S7-1500 dimulai dari alamat Q0.0 sampai dengan Q65535.7. Dan yang terhubung langsung dengan *peripheral* dimulai dari alamat Q124.0 sampai dengan Q124.5. Alamat *memory* S7-1500 PLC Siemens ini menyediakan lokasi memori yang berbeda-beda, dengan pengalamatan yang sangat unik. Kita dapat memilih memori mana yang akan kita pakai dengan terlebih dahulu memilih spesifikasi alamat, yang meliputi *memory area*, *address Byte*-nya dan *Bit number*-nya. PLC memiliki kemudahan untuk menambahkan piranti *input* dan *output* dengan *bus data* yang sudah tersedia[5]

Totally Integrated Automation Portal (TIA PORTAL) merupakan *software* yang

digunakan dalam pemrograman sebuah sistem otomasi dengan menggunakan PLC Siemens. TIA PORTAL itu sendiri merupakan perkembangan *software* sebelumnya yakni Simatic Step7. Dari segi pemrograman dasar TIA PORTAL hampir sama dengan *Simatic S7*. TIA PORTAL V.11 [6] sudah diintegrasikan dengan Simatic HMI nya untuk *interface* dalam proses *monitoring plant*. *Software* ini memudahkan para penggunanya untuk melakukan pengembangan dan komisioning terhadap sistem otomasi secara cepat dan intuitif, yang memberikan efisiensi lebih terhadap waktu dan biaya yang diakibatkan oleh adanya berbagai macam *software* dalam melakukan integrasi.

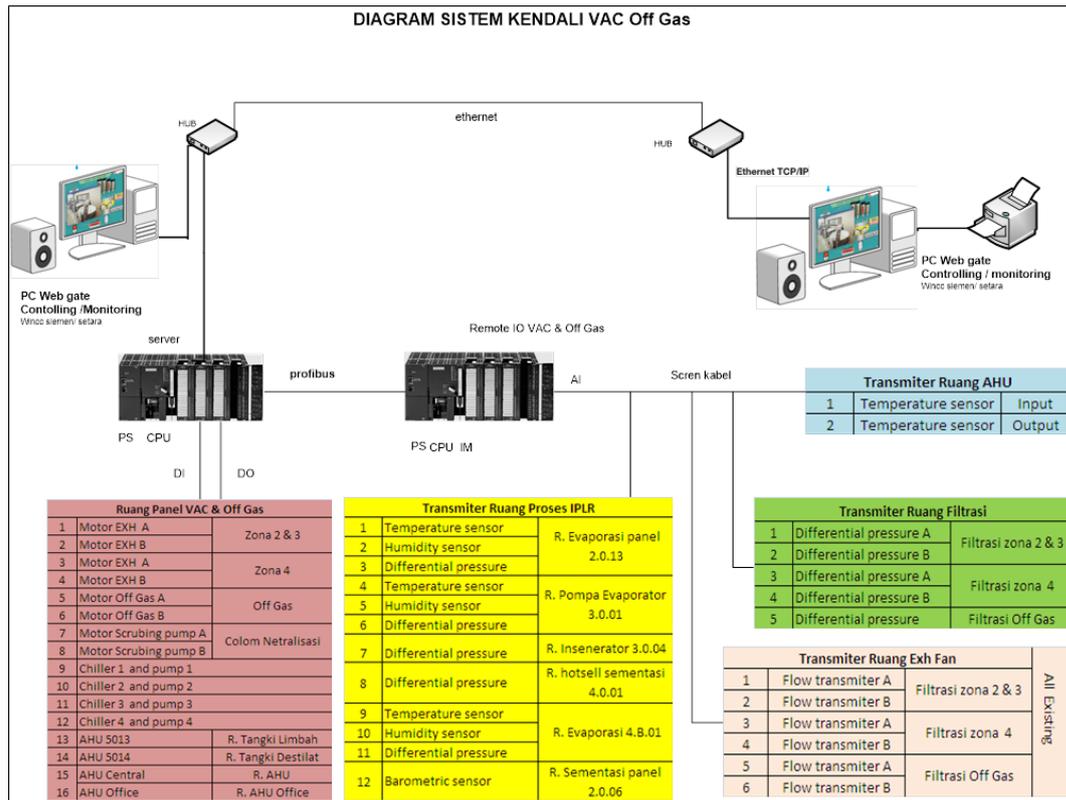
Tabel 2. Spesifikasi *Hardware* PLC untuk sistem kendali VAC Off-Gas IPLR

No	Nama	Spesifikasi	Jumlah
PLC Hardware			
1	CPU PLC	<i>Simatic S7-1500, CPU 1515-2 PN, Central Processing Unit with Working Memory 500 KBfor Program and 3 MBfor Data,</i>	1 buah
2	Interface Modul	<i>Simatic ET 200MP. Profinet IO -Device Interface Module IM 155-5 PN STfor ET 200MP Elektronik Modules.</i>	1 buah
3	Power Suppy	<i>Simatic PM 1507 24 V/8 A Stabilized Power Supply for Simatic S7-1500 Input: 120/230 V Ac Output: 24 V/8 A DC</i>	2 buah
4	Digital Input	<i>Simatic S7-1500, Digital Input Module DI 32 X DC 24 V, 32 Channels in Groups of 16</i>	2 buah
5	Digital Output	<i>Simatic S7-1500, Digital Output Module DO 32 X 24 VDC/0.5 A; 32 Channels in Groups of 8</i>	2 buah
6	Analog Input	<i>Simatic S7-1500, Analog Input Module AI 8 X</i>	4 buah
7	Front Connector	<i>Simatic S7-1500, Front Connected Screw-Type, 40pin, for 35mm Wide Modules, Incl. 4 Jumpers, and Cable Strap</i>	8 buah
8	Rail Mounting	<i>Simatic S7-1500, Mounting Rail 482 mm (Appr. 19 Inch)</i>	2 buah
9	Memory Card	<i>Simatic S7, Memory Card for S7-1x00 CPU/dinamics, 3,3 V Flash, 4 MB</i>	1 buah
10	Profinet Cable	<i>Simatic Net, IE FC TP Standard Cable, Gp 2x2 (Profinet Type A)</i>	100 buah
11	Relay	<i>24 Volt DC Coil with LED Pilot SPDT IDEC</i>	24 buah
12	License	<i>Win CC Flexible 2008 Runtime</i>	1 buah
13	PC controlling / monitoring dan recording realtime data operasi	<i>PC Intel Core i5-4590, 4GB DDR3, 500GB HDD, DVDRW, VGA Intel HD Graphics 4600, Win 7 Pro, With 24" Touchscreen include wincc shoftware control dan monitoring PLC PROGRAM, Web base system, data looging: avaible convert to word, exel, PDF</i>	1 buah

SENSOR INSTRUMENT			
1	RTD PT100 Sensor	Diameter 6mm Panjang 5cm Drat	2 buah
2	<i>Defferential Pressure</i>		
	<i>Dwiyer model</i>	DM-2007-LCD	8 buah
	<i>display</i>	3.5 digit LCD	
	<i>range press</i>	0 to 1243 Pa (0-5 in w.c)	
	<i>output signal</i>	4 to 20 mA	
	<i>power</i>	10-35 VDC (2 wire)	
3	<i>Temperatur & Humidity Transmitter</i>		4 buah
	<i>Dwiyer model</i>	RHP-3N44-LCD	
	<i>display</i>	Optical LCD	
	<i>range temperature</i>	-20 to 60°C	
	<i>range Humidity</i>	0 to 100 %RH	
	<i>output signal</i>	4 to 20 mA	
	<i>power</i>	10-35 VDC	
4	<i>Barometric pressure transmitter</i>		1 Buah
	<i>Operating temperaturerange:</i>	0 to +50°C	
	<i>Operating relative humidity range:</i>	5 to 95%RH	
	<i>Current output:</i>	4 to 20mA, two-wire connection	
	<i>Power:</i>	9-30Vdc	
	<i>Maximum pressure range</i>	: 600 to 1100hPa	
	<i>Setting from the manufacturer</i>	4-20mA/800-1100hPa	
CABLE CONTROL			
1	<i>Cableliycy3 X 0.75mm</i>	<i>Screen Cable Control</i>	600 meter
2	<i>Cablekontrol 1 X 0.75mm</i>	<i>NYYHYCable Control</i>	400 meter
3	<i>Cable kontrol 3 x 0.75mm</i>	<i>NYYHYCable Control</i>	200 meter
4	<i>Selang pneumatic instrument</i>	8 X 2 mm, transparan,	150 meter
5	<i>Selang pneumatic instrument</i>	23 X 6 mm, transparan	150 meter
6	<i>Accessories</i>	<i>Fittingdan connectorpneumatic piping instrument</i>	1 set
PANEL CONTROL			
1	<i>Powder Coating</i>	1000 x 210 x 760	2 buah
2	<i>Accessories Panel</i>	<i>Scun kabel, isolator, tombol, selector, lampu indikator</i>	1 set

Diagram sistem kendali dibuat untuk memetakan koneksi jaringan distribusinya. Rancangan diagram sistem kendali VAC Off-Gas IPLR diperlihatkan pada Gambar 2. Gambar menunjukkan bahwa pengendalian dapat dilakukan dari dua ruang kendali. Koneksi data

kedua ruang kontrol menggunakan fasilitas internet karena posisi berjauhan. Seluruh kendali on-off dikoneksikan ke CPU sedangkan untuk monitor sinyal informasi alat dan pengukuran parameter operasi dikoneksikan melalui *interface modul*.



Gambar 2. Rancangan diagram sistem kendali VAC Off-Gas IPLR

KESIMPULAN

Dari bahasan diatas dapat disimpulkan bahwa dalam rancangan sistem kendali VAC Off-Gas IPLR membutuhkan komponen CPU 1515-2 PN sebanyak 1 buah. Interface modul IM 155-5 PN ET 200MP sebanyak 1 buah. Catu daya PM 1507 24 V/8 A sebanyak 2buah. Digital Input Module DI 32 X DC 24 V, 32 Channels in Groups of 16 sebanyak 2 buah. Digital Output Module DO 32 X 24 VDC/0.5 A; 32 Channels in Groups of 8 sebanyak 2 buah. Analog Input Module AI 8 X sebanyak 4 buah. Kabel profinet untuk komunikasi data serta kabel screen untuk peralatan sensor. Komponen software pemrograman Simatic 7 dan Win CC Flexible 2008 Runtime. Komponen sensor : RTD PT 100, Defferential Pressure, Temperatur & Humidity Transmitter, Barometric pressure transmitter. Operasi kendali on-off dikoneksikan ke CPU melalui perangkat input/output di ruang kontrol sedangkan pemantauan informasi kinerja alat dan pengukuran parameter operasi dikoneksikan ke Human Machine Interface (HMI) modul melalui perangkat input/output.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kami ucapkan kepada Bapak Purwantara, Bapak Gatot Sumartono, dan Bapak I Wayan B.W. atas masukan, saran dan diskusi dalam penyusunan.

DAFTAR PUSTAKA

1. System Note VAC WSPG 510 NTA 9001 TECHNIATOME, (1986)
2. System Note Off Gas WSPG 520 NTA 9001 TECHNIATOME, (1986)
3. Budiyono, Untara, Gatot Sumartono, "Pengaruh VAC OFF-GAS Terhadap Tingkat Kontaminasi Udara Pada Instalasi Pengolahan Limbah Radioaktif di Serpong" PTLR, Serpong, 2009.
4. Iwan Setiawan, " Programmable Logic Controller dan Teknik Perancangan Sistem Kontrol", Penerbit Andi, Yogyakarta, 2006.
5. Siemens, "The Simatic S7 System Family", Germany, 2011
6. Siemens, "Simatic Steep 7 Profesional VII SP2", Germany, 2011
7. Dwyer Instruments Pty Ltd, "Dwyer Catalog", US, 2016

UJI KELAYAKAN OPERASI GENSET BRV20 RSG-GAS SETELAH DILAKUKAN PERBAIKAN

Teguh Sulistyono

Bidang Sistem Reaktor Pusat Reaktor Serba Guna

Kawasan Nuklir Serpong Gedung 31 Serpong, Tangerang Selatan Banten

Email: tsulistyo123@yahoo.com

ABSTRAK

UJI KELAYAKAN GENSET BRV20 RSG-GAS SETELAH DILAKUKAN PERBAIKAN. Uji kelayakan merupakan salah satu cara untuk menilai dan memastikan kelayakan genset BRV20 dapat dioperasikan secara aman, andal dan tidak menimbulkan kerusakan terhadap lingkungan. Uji kelayakan ini meliputi *test run* dan uji elektrik yang dilakukan secara bersamaan selama 1 jam 10 menit sesuai prosedur MRM1/6.1.2/6. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menilai dan memastikan bahwa genset BRV20 RSG-GAS layak dioperasikan secara aman, andal dan tidak menimbulkan kerusakan terhadap lingkungan setelah perbaikan. Hasil dari uji kelayakan ini dapat dipastikan bahwa genset BRV20 dapat dioperasikan secara aman, andal dan tidak menimbulkan kerusakan terhadap lingkungan dan kondisi terkini semua komponen sistem berfungsi baik dan tidak ditemukan adanya kebocoran oli dan air pada mesin serta tidak ditemukan adanya penyimpangan terhadap nilai batas operasi yang disyaratkan sehingga genset BRV20 dapat mendukung operasi reaktor RSG-GAS.

Kata kunci: uji kelayakan, genset BRV20

ABSTRACT

FITNESS TEST GENSET BRV 20 RSG-GAS DONE AFTER REPAIR. Feasibility test is one way to assess and ensure the feasibility of the generator can be operated BRV20 can be operated safely, reliably and does not cause damage to the environment. These include the feasibility test run and test electric performed concurrently for 1 hour 10 minutes according to the procedure MRM1 / 6.1.2 / 6. The purpose of this study is to assess and ensure that genset BRV 20 RSG-GAS worthy to be operated safely, reliably and does not cause damage to the environment after repairs. The results of this feasibility test can be ascertained that genset BRV 20 RSG-GAS worthy to be operated safely, reliably and does not cause damage to the environment and current conditions of all system components work well and there were no leakage of oil and water in the engine and there were no deviations from the values specified operating limits so that the generator can support the operation of the reactor BRV20 RSG-GAS.

Keywords: feasibility test, genset BRV20

PENDAHULUAN

Di dalam Undang-Undang Nomor 30 tahun 2009 Tentang Ketenagalistrikan, pasal 44 ayat 4 dijelaskan bahwa setiap instalasi tenaga listrik maupun peralatan atau mesin listrik yang beroperasi wajib memiliki Sertifikat Laik Operasi (SLO). Untuk memperoleh SLO maka setiap instalasi tenaga listrik maupun peralatan atau mesin listrik yang beroperasi harus melalui uji kelayakan operasi yang dikeluarkan oleh instansi berwenang.

Uji kelayakan genset merupakan salah satu cara untuk menilai dan memastikan kelayakan suatu genset dapat dioperasikan secara aman, andal dan tidak menimbulkan kerusakan terhadap lingkungan. Uji kelayakan yang dimaksud dalam penelitian ini yaitu kemampuan dan kehandalan genset BRV20 RSG-GAS setelah dilakukan perbaikan.

Pada penelitian ini, uji kelayakan genset BRV20 RSG-GAS dilakukan dengan cara uji *test run* dan uji elektrik. Kedua pengujian ini

dilakukan secara bersamaan selama 1 jam 10 menit sesuai prosedur MRM1/6.1.2/6. Hal yang melatarbelakangi penelitian ini adalah untuk mengetahui adanya kebocoran oli maupun air pada body mesin dan kualitas listrik yang dihasilkan oleh genset tersebut selama dan setelah kedua uji tersebut dilakukan.

Tujuan penelitian ini yaitu untuk menilai dan memastikan bahwa genset BRV20 RSG-GAS layak dioperasikan secara aman, andal dan tidak menimbulkan kerusakan terhadap lingkungan setelah perbaikan. Dari hasil pengujian ini diharapkan genset BRV20 RSG-GAS siap dioperasikan dengan aman serta dapat mendukung kegiatan operasi reaktor RSG-GAS.

TEORI

Sistem genset dirancang untuk dapat berfungsi sebagai sumber penyedia daya listrik cadangan atau darurat dan beroperasi disaat listrik PLN mengalami gangguan. Dengan demikian genset senantiasa harus dalam kondisi

terpelihara baik. Sistem genset yang senantiasa terpelihara baik memastikan genset dapat beroperasi baik pula.

Ketika genset mengalami kegagalan operasi, salah satu penyebabnya karena prosedur perawatan yang salah atau kelalaian dalam perawatan. Misalnya tombol start dalam posisi OFF bukan AUTO, batere untuk starting mati, atau kekurangan masa charging dan filter bahan bakar tersumbat karena terkontaminasi kotoran dan zat lainnya. Semua jenis gangguan tersebut di atas dapat dihindari dengan melakukan perawatan genset secara baik sesuai prosedur perawatan dan pemeriksaan dalam periode mingguan, bulanan dan tahunan yang dilakukan oleh operator/teknisi terlatih sehingga dapat memastikan bahwa genset dan sistem kontrolnya dapat beroperasi handal.

Upaya untuk menjaga genset selalu dalam kondisi siap dioperasikan maka perlu dilakukan pemeliharaan preventif meliputi:

1. Pemeriksaan umum;
2. Pemeliharaan sistem pelumasan;
3. Pemeliharaan sistem pendingin;
4. Pemeliharaan Sistem bahan bakar;
5. Pemeliharaan Batere starting;
6. Pemanasan mesin (*test run*).

Pada pemeliharaan preventif, jadwal pemeliharaan berbasis aplikasi daya spesifik dan

tingkat kondisi lingkungan operasi genset seperti kondisi operasi genset sering digunakan untuk mengetahui kondisi operasional yang ekstrim, maka waktu pelaksanaan pemeliharaan direkomendasikan untuk dipersingkat atau lebih sering dilakukan.

Beberapa faktor yang menyebabkan perawatan perlu lebih sering dilakukan antara lain:

- a) Genset digunakan secara berkesinambungan sebagai daya utama (*Prime Power*);
- b) Suhu lingkungan yang ekstrim;
- c) Paparan cuaca;
- d) Paparan air garam;
- e) Paparan debu, pasir, atau partikel udara lainnya.

Jika genset beroperasi pada kondisi yang ekstrim seperti dijelaskan di atas, upaya yang terbaik adalah melakukan konsultasi dengan supplier genset untuk menentukan jadwal dan cara perawatan yang tepat. Cara terbaik untuk melacak interval perawatan adalah dengan menggunakan *running-time meter* pada genset untuk menjaga keakuratan log dari semua perawatan yang dilakukan. Log ini juga akan menjadi penting untuk dukungan garansi. Pada Tabel 1 ditunjukkan jenis dan jadwal pemeliharaan genset.

Tabel 1. Jenis dan jadwal perawatan genset[1]

Jenis perawatan	Waktu Service				
	Harian	Mingguan	Bulanan	6 Bulanan	Tahunan
Inspeksi	X				
Periksa Level Coolant	X				
Periksa Level Oli	X				
Periksa Level Solar	X				
Periksa Saluran Udara	X				
Periksa/bersihkan Filter Udara		X			
Periksa Charger Baterai		X			
Buang solar pada Filter		X			
Buang Air Pada Tanki Solar		X			
Periksa Konsentrasi Coolant			X		
Periksa Tegangan Belt2			X		
Periksa Pengembunan Knaipot			X		
Periksa Baterai			X		
Ganti Oli & Filter				X	
Ganti Filter Coolant				X	
Bersihkan Crankcase Breather				X	
Ganti Filter Udara				X	
Periksa Selang2 Radiator				X	
Ganti Filter Solar				X	
Bersihkan Sistem Pendingin					X

TAHAPAN UJI KELAYAKAN

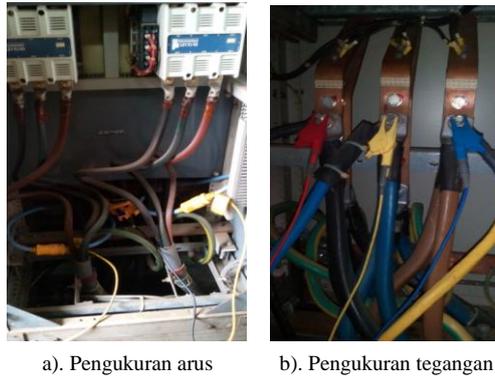
Tahapan uji kelayakan genset BRV20 RSG-GAS diawali dengan menyiapkan SOP, prosedur dan APD yang akan digunakan, kemudian dilanjutkan dengan pemasangan alat ukur kualitas listrik yaitu *Power Quality Analyzer* (PQA) type 3197 pada jalur panel

utama genset. Tahap berikutnya melakukan *test run* selama lebih kurang 1 jam 10 menit sesuai prosedur. Selama uji kelayakan berlangsung data pengukuran kualitas listrik dan kondisi mesin genset di monitoring serta di dokumentasikan kemudian hasilnya dianalisa.

Pengukuran kualitas listrik di panel GS003 LVMDP dilakukan pada hubungan satu

fasa (fasa-netral). Hal ini dikarenakan terdapat kesulitan saat melakukan pemasangan *fleksible clamp* arus PQA. Kesulitan ini dikarenakan letak

kabel daya pada busbar terbagi menjadi dua bagian, seperti ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Lokasi pengukuran listrik dengan PQA

Sedangkan pada Gambar 2 dan Tabel 2 menunjukkan model alat PQA dan spesifikasi teknis dari alat tersebut.



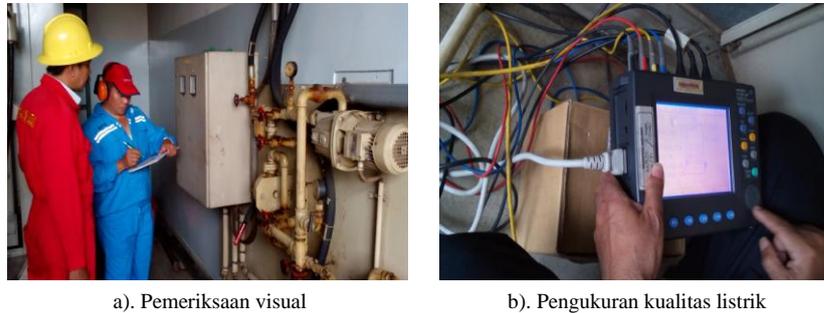
Gambar 2. Power Quality Analyzer[2]

Tabel 2. Spesifikasi Power Quality Analyzer (PQA)[2]

Measurement line type	Model wiring
Measurement range	Single-phase 2-wire, single-phase 3-wire, three-phase 3-wire, three-phase 4-wire [Voltage] 600.0 V AC, [Current] 500.0 mA to 5.000 kA AC (depends on current sensor in use), [Power] 300.0 W to 9.00 MW (depends on combination of current range and line type)
Basic accuracy	Voltage: ± 0.3 % rdg. ± 0.2 % f.s. Current: ± 0.3 % rdg. ± 0.2 % f.s. + current sensor accuracy Active power: ± 0.3 % rdg. ± 0.2 % f.s. + current sensor accuracy (at power factor=1)
Measurement items	1. RMS Voltage and Current (200 ms calculation) 2. Voltage (1/2) RMS: one cycle calculation refreshed every half cycle 3. Current (1/2) RMS: half-cycle calculation 4. Frequency 5. Active Power/ Reactive Power/ Apparent Power/ Power Factor/ Displacement Power Factor/ Active or Reactive Energy Consumption 6. Demand (Active or Reactive power) 7. Up to 50th Harmonic Analysis (Time series measurement or recording is not available) 8. Peak Voltage and Current 9. Total harmonic voltage distortion ratio 10. Voltage Unbalance Factor 11. K Factor (Time series recording is not capable) 12. Total harmonic current distortion ratio (Time series recording is not available)

Pada bagian ini disajikan pula beberapa foto kegiatan uji kelayakan genset BRV20 RSG-GAS yang dilaksanakan pada tanggal 27 Mei

2016 sesuai prosedur perawatan genset BRV20 RSG-GAS. Pada Gambar 3 ditunjukkan foto kegiatan uji kelayakan BRV20 RSG-GAS



Gambar 3. Kegiatan uji kelayakan genset BRV20 RSG-GAS

HASIL DAN BAHASAN

Pada bagian ini membahas hasil uji kelayakan genset BRV20 RSG-GAS yang terdiri atas hasil uji test run dan hasil uji elektrik.

4.1 Hasil test run

Pada Tabel 3 dan Tabel 4 ditunjukkan hasil uji kelayakan genset BRV20 RSG-GAS setelah perbaikan.

Tabel 3. Hasil test run genset BRV20 RSG-GAS

Opera si Gense t	Lama Pembeban an (menit)	Tegang an (V)	Aru s (A)	Day a (k W)	Frekuen si (Hz)	Kecepat an (Rpm)	BRV20			
							Pelumas		Air Pendingin	
							Suhu (°C)	Tekan an Bar	Suhu (°C)	Tekan an Bar
Nilai Batas Opera si		340- 440			50-57	400- 1710	120 maks.	1,5 min	94 maks	0,5 min
Step 0	5	400	-	-	51	1500	65	3,5	65	3
Step I	20	400	250	160	50	1500	100	3,5	75	3
Step II	40	400	480	330	50	1500	110	3,5	80	3
Step 0 Auto	5 -	400 -	- -	- -	50 -	1500 -	110 -	3,5 -	80 -	3 -

Dari Tabel 3, sejak awal genset BRV20 RSG-GAS dioperasikan pada step O, step I dan step II genset BRV20, terlihat bahwa hasil uji test run menunjukkan genset BRV20 RSG-GAS beroperasi baik dan aman. Selama dioperasikan, tidak ditemukan adanya penyimpangan terhadap nilai batas operasi yang disyaratkan, seperti kecepatan putaran rata-rata sebesar 1500 rpm, suhu pelumas tidak melebihi 120°C, tekanan pelumas rata-rata lebih besar dari 1,5 bar, suhu air pendingin tidak melebihi 94°C dan tekanan air pendingin lebih besar dari 0,5 bar serta

tegangan yang dihasilkan rata-rata sebesar 400 VAC.

Selanjutnya pada Tabel 4 ditunjukkan hasil pemantauan selama dan setelah genset BRV20 RSG-GAS dioperasikan. Hasil pemantauan terhadap level air baterai, kebocoran pada sistem bahan bakar, kebocoran pada sistem pelumasan, kebocoran pada sistem air pendingin (Radiator), level air pendingin, fungsi Heater pada sistem pendingin, fungsi Heater pada generator, level oli mesin, level tangki harian bahan bakar (%), level tangki penyimpanan

bahan bakar (%), fungsi alat pengontrol kebocoran dan sistem pengisian batere semuanya

menunjukkan tidak adanya penyimpangan terhadap nilai batas operasi yang disyaratkan.

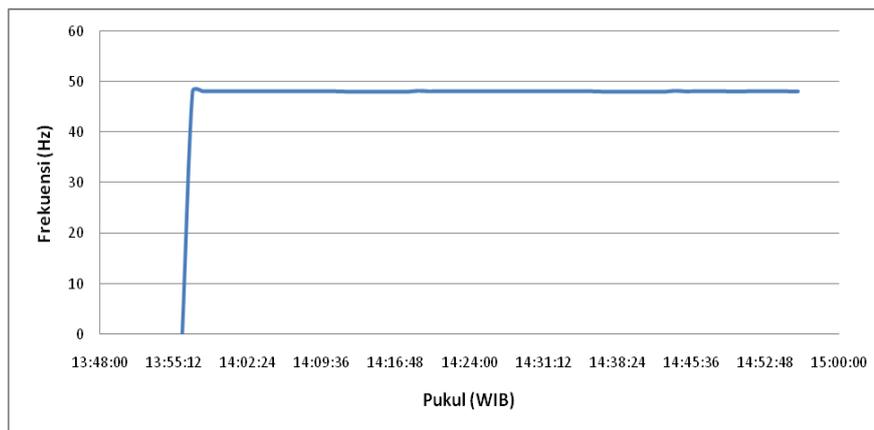
Tabel 4. Hasil pemantauan genset BRV20 RSG-GAS

Ruang Lingkup Pemantauan	Metoda	Hasil Pemantauan
Level Air Batere	Visual	Maksimum
Kebocoran Pada Sistem Bahan Bakar	Visual	Tidak Ada
Kebocoran Pada Sistem Pelumasan	Visual	Tidak Ada
Kebocoran Pada Sistem Air Pendingin (Radiator)	Visual	Tidak Ada
Level Air Pendingin	Visual	Maksimum
Fungsi Heater Pada Sistem Pendingin	Manual	Berfungsi Baik
Fungsi Heater Pada Generator	Manual	Berfungsi Baik
Level Oli Mesin	Tongkat Ukur	Maksimum
Level Tangki Harian Bahan Bakar (%)	GS006	63%
Level Tangki Penyimpanan Bahan Bakar (%)	GS006	71%
Fungsi Alat Pengontrol Kebocoran	GS006	Berfungsi Baik
Sistem Pengisian Batere	GS005	27V/2A

4.2 Hasil uji elektrik

Pada Gambar 4 sampai dengan Gambar 8 ditunjukkan beberapa hasil pengukuran listrik

hubungan satu fasa (fasa-netral) pada uji elektrik genset BRV20 RSG-GAS selama dioperasikan.



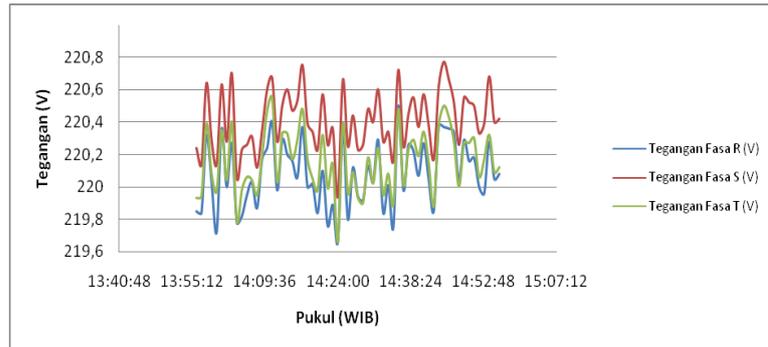
Keterangan Gambar 3:

Nilai	Frekuensi (Hz)
Maks	48,17
Min	0,00
Average	47,27

Gambar 4. Hasil pengukuran frekuensi (Hz)

Dari Gambar 4, sebelum genset dihidupkan, semua parameter besaran listrik menunjuk pada nilai nol, dan saat genset dihidupkan maka paramater besaran listrik mulai

menunjukkan nilai besarnya. Selama genset dioperasikan, besaran frekuensi yang terekam dari alat ukur PQA rata-rata sebesar 47,27 Hz.



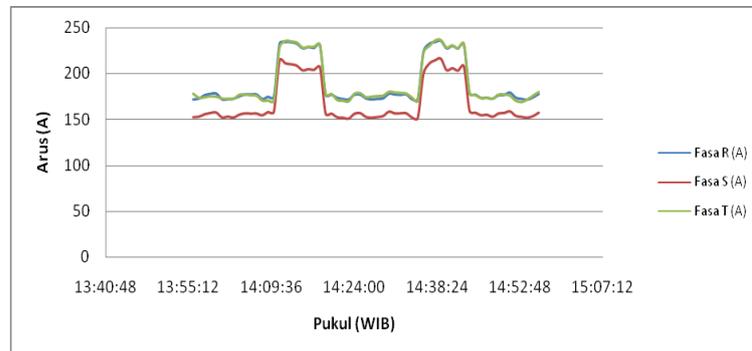
Keterangan Gambar 4:

Nilai	Tegangan Fasa R (V)	Tegangan Fasa S (V)	Tegangan Fasa T (V)
Maks	220,50	220,77	220,55
Min	219,66	219,94	219,66
Average	220,08	220,41	220,16

Gambar 5. Hasil pengukuran tegangan fasa R, S dan T

Dari Gambar 5, ditunjukkan hasil pengukuran tegangan fasa R, S dan T pada hubungan satu fasa (fasa-netral) selama genset dioperasikan. Nilai besaran tegangan fasa R, S

dan T yang terekam dari alat ukur PQA masing-masing rata-rata sebesar 220,08 VAC, 220,41 VAC dan 220,16 VAC.



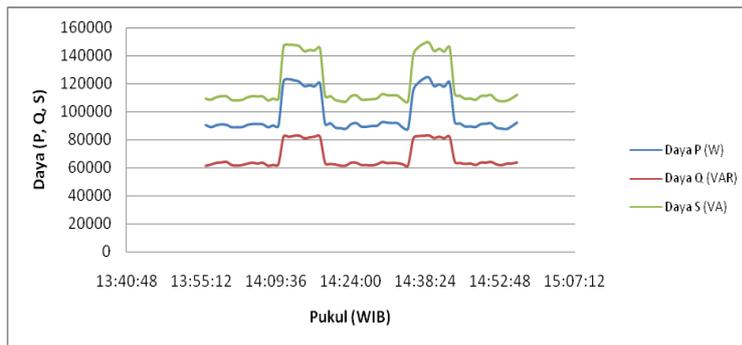
Keterangan Gambar 5:

Nilai	Arus Fasa R (A)	Arus Fasa S (A)	Arus Fasa T (A)
Maks	235,37	215,81	236,24
Min	171,24	150,69	169,12
Average	189,21	168,56	189,54

Gambar 6. Hasil pengukuran arus fasa R, S dan T

Dari Gambar 6, ditunjukkan hasil pengukuran arus fasa R, S dan T pada hubungan satu fasa (fasa-netral) selama genset

dioperasikan. Nilai besaran arus fasa R, S dan T yang terekam dari alat ukur PQA masing-masing sebesar 235,37 A; 215,81 A dan 236,24 A.



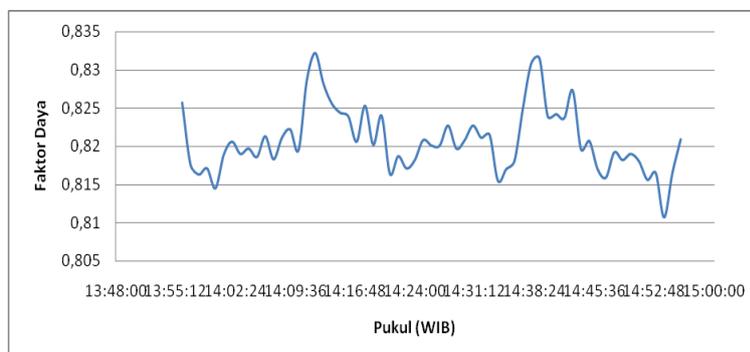
Keterangan Gambar 6:

Nilai	Daya P (W)	Daya Q (VAR)	Daya S (VA)
Maks	124.530	83.200	149.770
Min	87.450	61.660	107.220
Average	97.955	68.059	119.282

Gambar 7. Hasil pengukuran Daya P, Q dan S

Dari Gambar 7, ditunjukkan hasil pengukuran daya P, Q dan S pada hubungan satu fasa (fasa-netral) selama genset dioperasikan. Nilai besaran daya P, Q dan S yang terekam dari alat ukur PQA, daya P sebesar 124,53 kW, daya Q sebesar 83,2 kVAR dan daya S sebesar 149,77

kVA. Jika diamati hasil dari pengukuran ini maka diketahui bahwa daya nyata P (kW) masih di bawah dari daya terpasang S (kVA), dengan kata lain bahwa kapasitas daya genset BRV20 RSG-GAS yang sudah terpakai baru sebesar 83,15%.



Keterangan Gambar 7:

	Faktor Daya
Maks	0,83
Min	0,81
Average	0,82

Gambar 8. Hasil pengukuran Faktor Daya

Dari Gambar 8, ditunjukkan hasil pengukuran faktor daya ($\cos \phi$). Selama genset beroperasi nilai besaran faktor daya yang terekam dari alat ukur PQA rata-rata sebesar 0,82 lag. Nilai ini lebih besar dari faktor daya yang tercantum pada nameplate spesifikasi teknisnya.

Hal ini menunjukkan bahwa genset BRV20 RSG-GAS bekerja dengan baik.

Dari pengamatan terhadap hasil pengukuran PQA selama genset BRV20 RSG-GAS dioperasikan diperoleh beberapa informasi yaitu saat terjadi peralihan operasi dari step O ke

step I maupun ke step II terlihat pada grafik adanya lonjakan parameter besaran listrik yang terukur, lihat Gambar 6, Gambar 7 dan Gambar 8. Dari grafik tersebut lonjakan yang terjadi berlangsung hanya beberapa saat lalu beberapa kemudian terjadi penurunan lonjakan. Hal ini akan terus terjadi selama perubahan beban pada genset BRV20 RSG-GAS terjadi.

Apabila hasil pengukuran tersebut di atas dibandingkan dengan nameplate spesifikasi teknis dari genset BRV20 RSG-GAS seperti ditunjukkan pada Tabel 5 maka hasil pengukuran kualitas listrik masih memenuhi nilai batas operasi genset BRV20 tersebut.

Tabel 5. Spesifikasi Genset BRV20 RSG-GAS [5]

Uraian	Spesifikasi
Type	VTA 28 G1
Kapasitas "stand by"	569 kVA (455 kW)
Kapasitas normal	518 kVA (414 kW)
Tegangan	400/231 volt, dengan regulasi tegangan $\pm 0,5$ %
Frekuensi	50 Hz
Faktor Daya	0,8 lag
Putaran	1500 rpm

4.3 Hasil pemantauan selama pengujian berlangsung

Pada Tabel 6 ditunjukkan hasil pemantauan sistem Genset BRV20 setelah perbaikan selama pengujian berlangsung.

Tabel 6. Hasil pemantauan sistem Genset BRV20 selama dan setelah perbaikan

Sistem	Komponen	Kondisi Terkini
A. Sistem Kelistrikan	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Charge/isi batere; ✓ Pengkabelan; ✓ Kerusakan stater motor; ✓ Alternator; 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Charge/isi batere berfungsi baik; ▪ Pengkabelan berfungsi baik; ▪ Stater motor berfungsi baik; ▪ Alternator berfungsi baik.
B. Sistem Bahan Bakar	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Injection timing; ✓ Sistem Bahan bakar; ✓ Ketersediaan Bahan Bakar; ✓ Filter solar; ✓ Udara dalam sistem bahan bakar; ✓ Pipa solar; ✓ Injection pump; ✓ Nozzle; 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Injection timing berfungsi baik; ▪ Sistem Bahan bakar berfungsi baik; ▪ Ketersediaan Bahan Bakar cukup memenuhi kebutuhan operasi genset RSG-GAS; ▪ Filter solar baru terpasang baik dan benar; ▪ Udara dalam sistem bahan bakar tidak ada; ▪ Tidak terdapat kebocoran dan kebuntuan pada pipa solar; ▪ Tidak ada kekurangan dan kelebihan solar pada injection pump; ▪ Nozzle berfungsi baik; ▪ Tidak terdapat kebocoran pada tangki solar, kran, pipa, filter, feed pump; ▪ Injection pump terkalibrasi.
C. Sistem Udara	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Filter udara; ✓ Pengoperasian pada suhu tinggi; ✓ Pipa knalpot 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kondisi filter udara bersih; ▪ Sistem udara dapat dioperasikan pada suhu tinggi; ▪ Tidak terdapat kebocoran pada pipa knalpot.
D. Sistem Pelumasan	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Oli; ✓ Kebocoran oli pada sistem pelumasan ✓ Pompa oli; ✓ Filter oli; ✓ Valve pengatur tekanan oli; 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Oli mesin telah diganti sesuai standar (SAE40) ▪ Tidak terdapat kebocoran oli pada sistem pelumasan; ▪ Pompa oli berfungsi baik; ▪ Filter oli sudah diganti baru dan berfungsi

	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Kapasitas oli 	<ul style="list-style-type: none"> baik; ▪ Valve pengatur tekanan oli berfungsi baik; ▪ Kapasitas oli memenuhi persyaratan.
E. Sistem Pendingin	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Sistem pendingin; ✓ Kapasitas air radiator; ✓ Kebocoran lapisan pemisah air dan oli ✓ Fan belt; ✓ Thermostat; 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sistem pendingin berfungsi baik; ▪ Kapasitas air radiator maksimum; ▪ Tidak terdapat kebocoran pada lapisan pemisah air dan oli; ▪ Kondisi dan kekencangan fan belt baik; ▪ Thermostat berfungsi baik.
F. Turbocharger	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Blower; ✓ Katup asap; ✓ Bearing; ✓ Baling-baling turbin atau blower; 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Blower berfungsi baik; ▪ Katup asap berfungsi baik; ▪ Kondisi Bearing baik; ▪ Baling-baling turbin atau blower berfungsi baik
G. Sistem Permesinan	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Kerenggangan klep; ✓ Kebocoran kompresi dari valve seat ✓ Klep-klep; ✓ Cylinder head gasket; ✓ Piston ring; ✓ Cylinder, piston dan ring; ✓ Crank shaft dan bearing; ✓ Main bearing dan conrod bearing; ✓ Baut conrod; ✓ Ruang bakar; ✓ Back lash pada gear; ✓ Bushing dari klep-klep; ✓ Governor; ✓ Timing buka atau tutup klep; ✓ Kebocoran pada seal water pump, seal liner, seal oil cooler 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Klep sudah di Setel dan berfungsi baik; ▪ Tidak terdapat kebocoran kompresi pada valve set; ▪ Klep-klep berfungsi baik; ▪ Cylinder head gasket sudah diganti baru dan berfungsi baik; ▪ Piston ring berfungsi baik; ▪ Cylinder, piston dan ring berfungsi baik; ▪ Crank shaft dan bearing berfungsi baik; ▪ Main bearing dan conrod bearing berfungsi baik; ▪ Baut conrod berfungsi baik; ▪ Ruang bakar berfungsi baik; ▪ Back lash pada gear berfungsi baik; ▪ Bushing dari klep-klep berfungsi baik; ▪ Governor berfungsi baik; ▪ Timing buka atau tutup klep berfungsi baik; ▪ Tidak terdapat kebocoran pada seal water pump, seal liner dan seal oil cooler

Dari penjelasan Tabel 6 di atas, hasil pemantauan terhadap sistem kelistrikan, sistem bahan bakar, sistem udara, sistem pelumasan, turbocharger dan sistem permesinan Genset BRV20 selama dan setelah uji *test run* menunjukkan genset BRV20 RSG-GAS beroperasi baik dan aman serta tidak ditemukan adanya penyimpangan terhadap nilai batas operasi yang disyaratkan. Kondisi terkini semua komponen dan sistem berfungsi baik dan tidak ditemukan adanya kebocoran oli dan air pada mesin genset BRV20 RSG-GAS.

KESIMPULAN

Kesimpulan dari hasil uji kelayakan yang telah dilakukan yaitu:

1. Genset BRV20 RSG-GAS beroperasi baik dan aman serta tidak ditemukan adanya penyimpangan terhadap nilai batas operasi yang disyaratkan.
2. Kondisi terkini semua komponen dan sistem berfungsi baik dan tidak ditemukan adanya kebocoran oli dan air pada mesin genset

BRV20 RSG-GAS sehingga dapat mendukung operasi reaktor RSG-GAS.

DAFTAR PUSTAKA

1. *ANNONYMOUS*, Prosedur Perawatan Genset BRV10/20/30 MRM1/6.1.2/6, Pusat Reaktor Serba Guna Batan;
2. *ANNONYMOUS*, *Manual Maintenance Power Quality Analyzer*, HIOKI, 2015;
3. YAN BONI MARSAHALA, "Evaluasi Daya Tersedia Busbar Darurat Pasca Modifikasi Sistem Listrik RSG-GAS", *Majalah Ilmiah Teknologi Keselamatan Nuklir Sigma Epsilon*, Volume 11, No. 1, Februari 2007.
4. INTERATOM, "MPR 30 Electrical Power Supply Summary", *System Description*, 1986.
5. INTERATOM, "Diesel Emergency Sets BRV10/20/30", *System Description*, 1986.

6. Interatom 1986, MPR 30 Electrical Power Supply Summary, System Description
7. Interatom 1986, MPR 30 Electrical Power Supply Summary, System Spesification
8. Interatom 1986, Diesel Emergency Sets BRV10/20/30 System Description
9. Interatom 1986, Diesel Emergency Sets BRV10/20/30 System Spesificatio.

ANALISIS SISTEM VENTILASI FASILITAS PRODUKSI ^{131}I DI PTRR BATAN

Mulyono, Hermanto, Sofyan Sori, Sriyono

PTRR - BATAN

Kawasan Puspiptek Serpong Gedung 50, Tangerang Selatan, Banten 15310

E-mail: mulyono1@batan.go.id

ABSTRAK

ANALISIS SISTEM VENTILASI FASILITAS PRODUKSI ^{131}I DI PTRR BATAN. Telah dilakukan analisa sistem ventilasi pada fasilitas proses ^{131}I berupa *glove box* yang dilapisi Pb dan dilengkapi dengan sistem ventilasi agar memenuhi persyaratan untuk proses ^{131}I . Tujuan dari kegiatan ini adalah untuk menganalisa arah aliran udara di dalam *glove box* maupun yang melewati *charcoal filter* aktif, sehingga sistem ventilasi dapat beroperasi sesuai syarat proses ^{131}I agar personil terhindar dari kontaminasi dan paparan radiasi berlebih. Metodologi yang digunakan adalah dengan melakukan pengukuran arah aliran udara menggunakan alat *flow meter* setiap satu bulan sekali menjelang proses ^{131}I dan dilakukan pembacaan *magnehelic* yang dicatat dalam lembar monitoring dari bulan Januari sampai dengan bulan Desember 2015. Data tersebut dianalisa sehingga dapat ditentukan tingkat kejenuhan filter karbon. Pada bulan November 2015 filter karbon dinyatakan jenuh dan diganti dengan cara membuatnya dengan ukuran 30x30x6 cm, dan di oven pada *temperature* 91 °C selama 2,5 jam. Kemudian sistem ventilasi diuji fungsi dan terbaca pada *magnehelic* 50 mmH₂O. Dengan penggantian dan pengujian filter karbon aktif ini berarti proses produksi ^{131}I dapat dilakukan.

Kata kunci: Fasilitas Produksi ^{131}I , *Glove Box*, Sistem Ventilasi, Filter Karbon Aktif

ABSTRACT

VENTILATION SYSTEM ANALYSIS IN ^{131}I PRODUCTION FACILITY IN PTRR BATAN. Ventilation system analysis has been performed in facility for processing ^{131}I such as the *glove box* lined Pb and equipped with a ventilation system that meets the requirements for the process of ^{131}I . The purpose of this activity is to analyze the direction of airflow in the *glove box* and passing through the active *charcoal filter*, so that the ventilation system can operate as per terms ^{131}I process, the personnel is protected from contamination and exposure to excessive radiation. The methodology used is by measuring the direction of air flow using a *flow meter* once a month ahead of the process and do readings ^{131}I *magnehelic* recorded in the monitoring sheet from January to December 2015. The data were analyzed to determine for carbon filter saturation level. In November 2015 saturated carbon filter was declared and replaced by making the size of 30x30x6 cm, and heated at temperatures of 91°C for 2.5 hours. Then the ventilation system was tested and the function and read on *magnehelic* 50 mmH₂O. With the replacement and testing of active carbon filter means ^{131}I process can be done.

Keywords : Production Facility ^{131}I , *Glove Box* , Ventilation Systems , Activated Carbon Filters

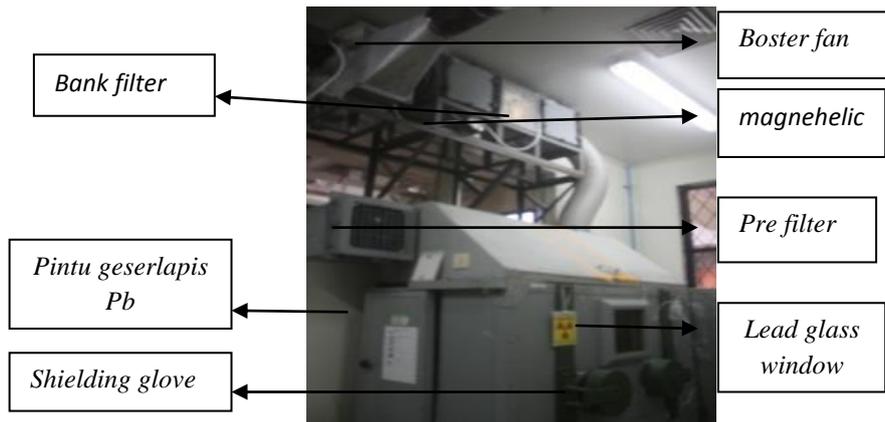
PENDAHULUAN

Dewasa ini penggunaan radioisotop untuk tujuan diagnosa maupun terapi suatu penyakit di bidang kesehatan telah banyak dilakukan, sehingga kebutuhan akan radioisotop semakin meningkat, salah satunya adalah radioisotop Iodium-131 (^{131}I). Radioisotop tersebut memancarkan partikel beta dengan energi maksimum 610 KeV dan juga pemancar gamma pada energi 364 KeV (81 %) dengan umur paro 8,04 hari sehingga dapat digunakan untuk keperluan diagnosa maupun terapi [1][2].

Pada awalnya PT. BATAN Teknologi (sekarang berubah nama menjadi PT. INUKI) memproduksi radioisotop ^{131}I untuk keperluan rumah sakit dalam negeri, namun semenjak tahun 2010 PT. INUKI sudah tidak beroperasi lagi sehingga Pusat Teknologi Radioisotop dan Radiofarmaka (PTRR)-BATAN harus mem-back

up kebutuhan radioisotop ^{131}I ke rumah sakit sesuai dengan Peraturan Kepala BATAN Nomor 16 TAHUN 2014 pasal 278. PTRR merupakan salah satu satker di Batan yang mempunyai tugas pokok melaksanakan perumusan dan pengendalian kebijakan teknis, pelaksanaan, pembinaan dan bimbingan di bidang teknologi produksi radioisotop dan radiofarmaka, sehingga PTRR ditugaskan untuk *back up facility* produksi radioisotop dan radiofarmaka meskipun hanya skala kecil.

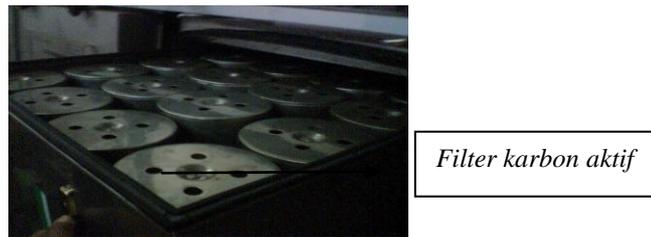
PTRR memiliki fasilitas produksi ^{131}I berupa *glove box* berlapis Pb. Dalam fasilitas produksi ^{131}I terdapat sistem ventilasi yang berfungsi untuk menangkap gas Iodium yang lepas dari proses pemanasan tellurium, sehingga kontaminasi ruangan dapat dihindari. Sistem ventilasi dilengkapi dengan filter-filter seperti prefilter, *charcoal filter*, *medium filter* seperti Gambar 1 [3].



Gambar 1. *Glove box* Proses ^{131}I

Sistem ventilasi *glove box* ^{131}I diintegrasikan ke sistem *exhaust* sentral untuk difiltrasi di FRU (*Filter Room Unit*) seperti Gambar 3 dan dibuang melalui cerobong. Sistem filtrasi dalam sistem *exhaust* sentral terdiri dari tiga tingkatan dengan posisi atas terdiri dari *Hepa filter*, pada posisi tengah terdiri dari filter

karbon dan posisi paling bawah terdiri dari *Hepa filter*. Pada *bank filter* karbon aktif masing-masing *bank* terdapat 16 buah seperti Gambar 2 yang bekerja bersamaan. Hal ini dimaksudkan agar luas media filter yang dilewati menjadi besar dan penggantian filter menjadi lebih lama.



Gambar 2. Filter karbon aktif 16 buah untuk masing-masing *bank*.

Untuk mengetahui kondisi filter, maka setiap *Hepa filter bank* dipasang *magnehelic* sehingga dapat dibaca tekanan filter.



Gambar 3. *Filter Room Unit* (FRU)

Dasar teori yang menjadi acuan dalam penulisan makalah ini adalah bahwa aliran udara yang mengalir dalam laboratorium yang mengolah zat radioaktif dipersyaratkan mengalir dari daerah bersih ke daerah yang lebih kotor, hal ini dimaksudkan bila di laboratorium

terjadi kontaminasi maka kontaminasi tersebut tidak menyebar ke luar ruangan yang lebih bersih dan diharapkan mengalir ke cerobong yang terlebih dahulu melewati sistem filter, sehingga udara yang keluar cerobong sudah bersih.

Tujuan dari kegiatan ini adalah untuk menganalisa arah aliran udara di dalam *glove box* maupun yang melewati *charcoal filter* aktif, sehingga diharapkan sistem ventilasi dapat beroperasi sesuai syarat proses ^{131}I yaitu agar personil terhindar dari kontaminasi dan paparan radiasi.

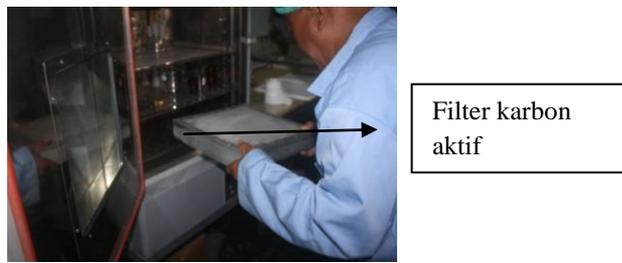
METODOLOGI

Bahan dan Peralatan

Bahan yang digunakan dalam kegiatan ini adalah pre filter yang dipasang di atas samping kiri *glove box*, karbon filter aktif yang dipasang pada bank filter untuk menangkap gas ^{131}I yang lepas dari proses pemanasan *Te* (*Telarium*), *medium filter* yang dipasang setelah karbon filter untuk menangkap debu karbon yang lolos, 2 buah *HEPA* (*Hight Efficiency Particulate Active*) filter yang dipasang di FRU untuk menangkap debu

dari dalam laboratorium, karbon filter aktif untuk menangkap gas ^{131}I . Sedangkan bahan untuk membuat filter karbon aktif yang berada di atas *glove box* adalah karbon aktif *granular*, rangka plat aluminium berprofil, dan kawat kasa untuk menahan karbon aktif, dengan ukuran (30x30x6) cm dan paku ripet, serta seal karet. Peralatan yang dipakai dalam pengamatan arah aliran udara pada proses ^{131}I adalah *flow meter digital* yang pembacaannya dapat langsung terbaca dalam satuan meter/detik.

Pada pembuatan filter karbon aktif dipakai alat Rol meter untuk mengukur panjang rangka, Gergaji tangan untuk memotong rangka Aluminium, Gunting plat untuk memotong kawat kasa, Tang ripet untuk meripet, kawat kasa yang membatasi karbon aktif. Pada proses pemanasan karbon filter aktif digunakan Oven yang diatur pada *temperature* 91 °C selama 2,5 jam lihat Gambar 4.



Gambar 4. Filter karbon aktif akan dimasukkan oven

Tata Kerja

Pengukuran arah aliran udara pada proses ^{131}I dilakukan paling sedikit satu bulan sekali sesuai jadwal proses ^{131}I yang dibuat oleh Bidang Teknologi Radioisotop yang mengikuti jadwal operasi Reaktor Serba Guna. Parameter yang diukur meliputi arah aliran udara dari koridor ke pintu 101, temperatur dan kelembaban ruangan 101 tempat terdapatnya pembacaan *magnehelic* filter karbon aktif. Ketersediaan *power emergency* perlu dipastikan untuk mendukung kelangsungan proses produksi seperti *power supply* operasi dari *Furnace* dan *boster fan*, khusus untuk *boster fan* dilakukan pengukuran *flow* untuk memastikan fungsinya.

Langkah selanjutnya adalah menganalisa data dari Tabel 1 sehingga diperoleh angka-angka untuk menentukan tindakan lebih lanjut. Jika diketahui ada *anomaly* maka dilakukan penggantian filter. Pembuatan filter karbon aktif dilakukan untuk mengganti filter karbon aktif yang sudah jenuh. Langkah terakhir adalah uji fungsi yang dilakukan dengan menghidupkan *boster fan*, sehingga pembacaan *magnehelic* terlihat. Dengan penggantian dan pengujian filter

karbon aktif ini berarti proses ^{131}I dapat dilakukan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Arah aliran udara pada pintu *glove box* menuju ke sistem filter harus ke arah dalam *glove box* dengan kecepatan alir rata-rata 1,00 meter/detik. Indikasi arah aliran dapat dilihat pada sarung tangan karet dalam *glove box* yaitu ditandai dengan karet yang menggelembung. Apabila kecepatan alir tidak tercapai maka sarung tangan karet tidak menggelembung. Hal ini dapat menyebabkan lepasan gas ^{131}I yang berakibat terjadinya kontaminasi pada ruangan tersebut. Untuk mempertahankan keandalan fasilitas diperlukan monitoring arah aliran udara paling sedikit satu bulan sekali, sehingga saat terjadi anomali segera dapat ditindak lanjuti. Dengan demikian proses ^{131}I dapat berjalan dengan aman dengan hasil yang baik. Pada bulan Mei 2015 dilakukan *balancing* pada sistem VAC di laboratorium sehingga arah aliran udara di ruang 101 dan *glove box* mengalami perubahan, yaitu rerata aliran udara di pintu *Glove box* dari 1,2 meter/detik turun menjadi 0,854 meter/detik.

Sedangkan pintu ruang 101 dari rerata 0,59 meter/detik turun menjadi 0 meter/ detik. Aliran udara ruang 129 semula rerata 0,544 meter/detik turun menjadi meter/detik. Penurunan aliran udara ini akibat dari pengaturan *dampers* pada laboratorium yang belum sesuai. Kemudian dilakukan *balancing* pada bulan September, Oktober dan November 2015 dengan cara pengaturan *dampers* yang ada pada laboratorium yang terkait. Hasilnya dapat dilihat pada Tabel 1. Bulan Oktober 2015 rerata aliran masuk *glove box* = 1,412 m/s terlihat naik dari bulan September yang hanya 0,696 m/s. Pembacaan *magnehelic* filter karbon aktif adalah

100 mmH₂O. Dari hasil monitoring tersebut maka pada bulan Nopember dilakukan penggantian filter karbon aktif, sehingga aliran udara meningkat dari 1,412 meter/detik menjadi 1,872 meter/detik dan pembacaan *magnehelic* turun dari 100 mmH₂O menjadi 50 mmH₂O, menandakan bahwa karbon filter tidak mampat, sehingga persyaratan untuk produksi ¹³¹I dapat dilakukan.

Data hasil pengukuran aliran udara yang masuk ruang 101 dan *Glove box* ¹³¹I tahun 2015 dapat dilihat pada Tabel 1. Data tersebut diambil beberapa jam sebelum proses produksi ¹³¹I dilakukan

Tabel 1. Data hasil pengukuran aliran udara yang masuk ruang 101 dan *Glove box* ¹³¹I.

No	Bulan	Lokasi Pengukuran	Hasil Pengukuran m/s					Rata-rata m/s	Pembacaan <i>Magnehelic</i> (mm H ₂ O)	Keterangan
1	Januari	<i>Glove box</i> ¹³¹ I	2.88	3.2	2.78	3.27	3.21	3.068	50	
		Pintu R.101	0.45	0.64	0.66	0.56	0.64	0.59		
		Pintu R.129	0.38	0.36	0.37	0.4	0.34	0.37		
2	Pebruari	<i>Glove box</i> ¹³¹ I	2.11	2.91	2.82	2.96	2.59	2.678	55	
		Pintu R.101	0.2	0.58	0.6	0.65	0.65	0.536		
		Pintu R.129	0.36	0.36	0.23	0.35	0.33	0.326		
3	Maret	<i>Glove box</i> ¹³¹ I	2.04	2.4	1.91	2.11	2.1	2.112	60	
		Pintu R.101	0.41	0.5	0.52	0.54	0.59	0.512		
		Pintu R.129	0.64	0.63	0.57	0.58	0.62	0.608		
4	April	<i>Glove box</i> ¹³¹ I	1.22	1.19	1.18	1.34	1.07	1.2	65	
		Pintu R.101	0.68	0.65	0.62	0.45	0.55	0.59		
		Pintu R.129	0.47	0.6	0.56	0.6	0.49	0.544		
5	Mei	<i>Glove box</i> ¹³¹ I	0.82	0.95	0.87	0.88	0.75	0.854	70	<i>Balancing</i>
		Pintu R.101	0	0	0	0	0	0		
		Pintu R.129	0	0	0	0	0	0		
6	Juni	<i>Glove box</i> ¹³¹ I	0.85	0.81	0.72	0.77	0.85	0.8	75	
		Pintu R.101	0	0	0	0	0	0		
		Pintu R.129	0	0	0	0	0	0		
7	Juli	<i>Glove box</i> ¹³¹ I	1.21	1.19	1.09	1.1	1.06	1.13	80	
		Pintu R.101	0	0	0	0	0	0		

		Pintu R.129	0	0	0	0	0	0		
8	Agustus	<i>Glove box</i> ¹³¹ I	1.2	1.19	1.08	1.07	1.1	1.128	85	
		Pintu R.101	0	0	0	0	0	0		
		Pintu R.129	0	0	0	0	0	0		
9	Sept.	<i>Glove box</i> ¹³¹ I	0.73	0.53	0.77	0.75	0.7	0.696	90	Balancing ruangan
		Pintu R.101	0	0	0	0	0	0		
		Pintu R.29	0	0	0	0	0	0		
10	Okt.	<i>Glove box</i> ¹³¹ I	1.15	1.41	1.47	1.57	1.46	1.412	95	Balancing ruangan
		Pintu R.101	0.73	0.89	0.97	1.05	1.17	0.962		
		Pintu R.129	0	0	0	0	0	0		
11	Nop.	<i>Glove box</i> ¹³¹ I	1.72	1.95	1.87	1.92	1.9	1.872	100	Filter karbon jenuh
									50	Ganti filter karbon
		Pintu R.101	0.96	0.99	1.13	1.1	0.92	1.02		
		Pintu R.129	0.44	0.31	0.19	0.33	0.25	0.304		
12	Des.	<i>Glove box</i> ¹³¹ I	1.31	1.68	1.32	1.49	1.76	1.512	55	
		Pintu R.101	1.03	1.15	1.18	1.26	1.32	1.188		
		Pintu R.129	1.1	0.72	1.09	0.88	1.42	1.042		

KESIMPULAN

Dari uraian di atas dapat dibuat kesimpulan bahwa sistem ventilasi pada proses ¹³¹I dapat dicapai dengan *balancing* laboratorium yang terkait dengan *Glove box*, sehingga kecepatan aliran udara pintu *Glove box*, karbon filter aktif, pintu ruang 101, pintu ruang 129, dapat mengalir dengan cukup cepat, sehingga kontaminasi ruangan dapat dicegah. Penggantian filter karbon aktif yang jenuh (terbaca 100 mmH₂O) memberikan pengaruh yang signifikan terhadap sistem ventilasi fasilitas proses ¹³¹I. Terbukti setelah penggantian pada *magnehelic* terbaca 50 mmH₂O.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih yang pertama disampaikan kepada Bp. Aceu Turyana S.Kom. selaku kbid BPFPR yang telah memberikan fasilitas, dan membimbing kami sehingga terselesaikannya makalah ini. Kedua kepada teman-teman dari subbidang keteknik dan Bidang keselamatan kerja serta semua yang tidak

dapat saya sebutkan satu-persatu yang telah memberikan kontribusinya sehingga peralatan *glove box* dapat terpasang di ruang 01 sehingga dapat digunakan untuk fasilitas proses ¹³¹I.

DAFTAR PUSTAKA

1. O. Y. Kochnov, V. V Kolesov, R. V Fomin, and G. M. Jerdev, "Assessment of the Increasing in ¹³¹I Production due to Improved Tellurium Target in the WWR-c Reactor Core," *Nucl. Energy Technol.*, vol. 000, pp. 1–5, 2016.
2. Maskur, Purwoko, Chairuman, Yono Sugiharto, "EVALUASI PEMBUATAN SENYAWA BERTANDA ¹³¹I - HIPURAN UNTUK DIAGNOSIS FUNGSI GINJAL" ISBN: 978-602-0951-05-8, 2015.
3. W. H. Wang, "Validation of the integrity of a HEPA filter system," *Health Phys.*, vol. 85, no. 5 Suppl, pp. S101–7, 2003.

APLIKASI SCADA DENGAN MEDIA KOMUNIKASI NIRKABEL 2.4 GHz UNTUK PENGENDALI OPERASI FASILITAS KANAL HUBUNG PENYIMPANAN SEMENTARA BAHAN BAKAR NUKLIR BEKAS (KHIPSB3)

Parjono , Budiyono

*Pusat Teknologi Limbah Radioaktif-Badan Tenaga Nuklir Nasional
Kawasan Puspiptek Serpong Gedung 50, Tangerang Selatan, Banten 15310
E-mail: jono@batan.go.id*

ABSTRAK

APLIKASI SCADA DENGAN MEDIA KOMUNIKASI NIRKABEL 2.4 GHz UNTUK PENGENDALI OPERASI FASILITAS KANAL HUBUNG PENYIMPANAN SEMENTARA BAHAN BAKAR NUKLIR BEKAS. Peralatan fasilitas Instalasi Penyimpanan Sementara Bahan Bakar Nuklir Bekas dioperasikan untuk menjamin keselamatan manusia dan lingkungan. Operasi peralatan dalam memenuhi Batas Kondisi Operasi yang aman harus terkontrol dan terpantau dengan baik. Peralatan dikendalikan dan dipantau dari lokasi terpisah yang berjarak 500 meter. Kedua lokasi belum terdapat jaringan kabel *Unshielded Twice Pair* maupun fiber optic. Oleh karena itu, kendali dan monitoring peralatan mengimplementasikan teknologi *Programmable Logic Controller* yang terintegrasi dengan sistem SCADA. Sistem mengaplikasikan jaringan nirkabel 2,4 Ghz sebagai media komunikasi sistem SCADA. Pemilihan jaringan nirkabel 2.4 Ghz atau *Wifi Standard wireless-G 802.11g*, karena media tersebut dapat mengirim dan menerima data sampai dengan 54 Mbps serta memiliki toleransi pemakaian dan gangguan yang lebih kecil jika dibandingkan dengan frekuensi 5.8 GHz. Sistem diaplikasikan dalam rangka efisiensi, mempermudah pengawasan dan pengendalian, serta akuisisi data. Metode dilakukan dengan pemasangan *Access point* dan *Client Bridge*, pengujian kualitas layanan jaringan atau *Quality of service (QoS)* dan uji fungsi aplikasi menggunakan *MTU-SCADA software Simatic Wincc Flexible*. Hasil pengujian kualitas layanan jaringan nirkabel didapat nilai *delay 4,35 milisecond* dan *packet loss 0%*. Nilai tersebut termasuk dalam kategori dan degradasi sangat bagus berdasarkan standar TIPHON. Aplikasi jaringan berfungsi dengan baik sehingga pengawasan, pengendalian dan akuisisi data (SCADA) untuk pengoperasian peralatan di IPSB3 gedung 38 dapat dilakukan secara baik dan optimal dari gedung 51.

Kata kunci : Bahan bakar nuklir bekas, PLC, SCADA, Nirkabel, QoS

ABSTRACT

APPLICATION OF SCADA USING WIRELESS COMMUNICATION MEDIA 2.4 GHz FOR CONTROLLING THE OPERATION OF TRANSFER CHANNEL INTERIM STORAGE FOR SPENT FUEL FACILITY. Interim storage facility equipment installation Used Nuclear Fuel operated to ensure the safety of humans and the environment. operating equipment to meet safe limits Operating Conditions should be controlled and monitored. Equipment is controlled and monitored from a separate location within 500 meters. Both locations have not been there *Twice Pair Unshielded cable networks* and fiber optic. Therefore, control and monitoring equipment to implement technology *Programmable Logic Controller* integrated with SCADA systems. Apply system 2.4 Ghz wireless network as communication media SCADA system. Selection of a 2.4 Ghz wireless network or *Wifi-G 802.11g wireless standard*, because the media can send and receive data at up to 54 Mbps and has a user tolerance and lower interference than the 5.8 GHz frequency. The system was applied in the context of efficiency, facilitate supervision and control, and data acquisition .. The method is done by mounting *Access point* and *Client Bridge*, testing the quality of network services or *Quality of service and function testing of applications using MTU- SCADA Simatic Wincc Flexible software*. Results of testing the quality of wireless network services obtained value of 4.35 millisecond delay and packet loss 0%. This value is included in the category and the degradation is very good by the standards TIPHON. Testing of the SCADA system with 2.4 GHz wireless communication media have been installed to work properly and optimally.

Keywords: spent fuel, programmable logic control, SCADA, Wireless, QoS

PENDAHULUAN

SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) adalah suatu sistem yang berbasis komputer yang berfungsi untuk pengawasan, pengontrolan dan pengumpulan data dalam suatu proses. Sistem SCADA terdiri atas antarmuka

(*Human-Machine Interface*) unit jarak jauh yang menghubungkan beberapa sensor pengukuran untuk pengawasan dan *Programmable Logic Controller (PLC)*. SCADA merupakan piranti otomatis pemulih gangguan yang dapat dilakukan seketika atau menangani gangguan secara langsung (*real time*) dari jarak

jauh. SCADA mengumpulkan data yang diperoleh dari RTU (*remote terminal unit*) pada MTU (*master terminal unit*) dan mengeksekusi perintah terhadap sistem yang sedang berjalan. Terdapat dua elemen penting yang berperan dalam SCADA, yaitu proses sistem yang dipantau dan jaringan peralatan HMI (*human machine interface*). Dilihat dari karakteristik sistem kontrolnya, sistem SCADA terbagi menjadi dua, yaitu *open loop* (komunikasi jarak jauh) dan *closed loop* (komunikasi jarak dekat). Perbedaan diantara keduanya terletak pada alat komunikasi yang digunakan, dimana pada sistem kontrol *open loop*, sistem SCADA menggunakan jaringan WAN (*wireless area network*) yang dilengkapi sistem radio sebagai pengirim dan penerima sinyal dari ribuan I/O dimana pengontrolan bisa dilakukan dari jarak ribuan kilometer. Sedangkan untuk *closed loop*, sistemnya mirip dengan DCS (*distributed control system*), dimana sistem ini merupakan unit pengumpul dan kontrol data yang ditempatkan pada area terbatas. Sistem komunikasi menggunakan DCS yang merupakan jaringan LAN (*local Area Network*). Sistem SCADA sangat bergantung pada jumlah RTU didalam pengumpulan dan pengiriman datanya. Ketepatan dan efisiensi waktu memungkinkan proses operasi peralatan IPSB3 menjadi lebih optimal dan aman.

Instalasi Penyimpanan Sementara Bahan Bakar Bekas (IPSB3) merupakan suatu fasilitas penerima dan penyimpan bahan bakar nuklir bekas dari Reaktor Serba Guna GA Siwabessy (RSG-GAS) serta menyimpan bahan teradiasi lain yang berasal RSG-GAS, Instalasi Produksi Radioisotop, dan Instalasi Radiometalurgi. Dalam menjamin keselamatan pekerja dan lingkungan maka operasi peralatan harus memenuhi syarat batas kondisi operasi yang aman. Kondisi peralatan dan parameter operasi di dalam fasilitas harus dipantau dan dikendalikan. Pengendalian dan pemantauan dilakukan terhadap sistem *ventilation and air conditioning (VAC)*, sistem purifikasi, sistem pendingin kolam, sistem Pusat Buangan Terpadu (PBT), sistem *demineralized water*, dan sistem air kolam penyimpanan.

Fasilitas peralatan IPSB3 harus dapat dikendalikan dan dipantau dari ruang kendali di Gedung 51 yang berjarak sekitar 500 meter dari ruang kendali utama Gedung 38. Antara kedua gedung tidak ada kabel *Unshielded Twice Pair* maupun *fiber optic* sebagai media komunikasi. Oleh karena itu diperlukan teknologi dalam menjalankan fungsi pemantauan, pengendalian, dan pengambilan serta pengumpulan data-data kondisi operasi peralatan. Teknologi yang diaplikasikan harus memiliki kestabilan dan kehandalan yang tinggi. Nirkabel 2.4 Ghz sebagai

media komunikasi SCADA dipilih untuk mengatasi permasalahan tersebut. Pemilihan jaringan nirkabel 2.4 Ghz atau Wifi Standard wireless-G 802.11g beralasan karena media tersebut dapat diinstal dengan mudah, dapat mengirim dan menerima data sampai dengan 54 Mbps serta memiliki toleransi pemakaian dan gangguan yang lebih kecil jika dibandingkan dengan frekuensi 5.8 GHz [1].

Makalah ini menguraikan tentang aplikasi SCADA menggunakan jaringan nirkabel 2.4 Ghz dalam pengendalian dan pemantauan peralatan proses di fasilitas penyimpanan bahan bakar nuklir bekas.

TEORI

Komunikasi SCADA diatur melalui suatu protokol karena kebanyakan sensor dan kontrol tidak dapat menghasilkan/menerjemahkan protokol komunikasi. RTU dibutuhkan sebagai jembatan komunikasi antara sensor dan jaringan SCADA. RTU mengubah masukan sensor ke format protokol dan mengirimnya ke master SCADA. Selain itu RTU juga menerima perintah dalam format protokol dan memberikan sinyal listrik yang sesuai ke relai kontrol yang bersangkutan. Pada umumnya jarak antara RTU dengan MTU cukup jauh sehingga diperlukan media komunikasi antara keduanya. Cara yang paling umum dipakai adalah komunikasi serat optik (*Optical Fiber Communication*). Sistem SCADA melakukan pelaporan status berbagai macam sensor baik analog maupun digital melalui sebuah komputer khusus yang sudah di buat HMI-nya atau HCI-nya (*human computer interface*). Akses ke kontrol ini bisa dilakukan secara lokal maupun berbasis *Web* atau sudah tersedia panel-panel kontrol *touch screen* yg telah tertanam software didalamnya. Pada pengontrolan data dilakukan pada ruang kendali utama (RKU), semua pengontrolan yang terjadi pada proses dapat ditambahkan pada satu sistem SCADA terpusat. Artinya kita dapat melakukan semua pengontrolan pada suatu sistem dengan sistem HMI (*Human Machine Interface*). *Master Terminal Unit (MTU)* memiliki SCADA Software yang memiliki fitur-fitur antara lain, *HMI (Human Machine Interface)*, *Graphics Display*, *Alarms*, *History Graph*, dan *Data Base*,

Jaringan Nirkabel

Jaringan Wifi atau *Wireless Fidelity* tidak menggunakan kabel, akan tetapi masih mempunyai topologi yang mendefinisikan bagaimana piranti nirkabel berinteraksi dengan *layer physical* pada model OSI. Teknologi Wi-Fi memiliki standar yang ditetapkan IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*). Jaringan

berbasis nirkabel standard 802.11 menggunakan komunikasi *spectrum* yang menyebar secara berurutan pada frekuensi 2.4 GHz, dimana piranti tersebut berkomunikasi satu sama lain menggunakan dua dasar topologi yaitu *ad hoc* dan *infrastructure* [2].

Jaringan Ad Hoc terdiri dari dua atau lebih perangkat *nirkabel* yang berkomunikasi secara langsung satu sama lain. Sinyal yang dihasilkan oleh *interface adapter* Jaringan Wifi adalah berarah *Omni* keluar ke rentang jangkauan yang dipengaruhi oleh faktor-2 lingkungan, dan juga sifat dari piranti yang terlibat. Jangkauan ini disebut sebagai suatu area layanan dasar (BSA – *basic service area*). Jaringan *infrastructure* menggunakan suatu piranti Wifi yang disebut *Access Point* (AP) sebagai suatu *bridge* antara perangkat nirkabel dan jaringan kabel *standard*. *Access Point* yang berisi *transceiver wireless compliant* adalah suatu unit yang menghubungkan ke jaringan *Ethernet* atau jaringan kabel lain oleh suatu kabel. Jika ada piranti *Wifi* lain masuk dalam jangkauan nirkabel *Access Point* ini maka ia bisa saling komunikasi dengan jaringan kabel, layaknya mereka terhubung dengan kabel.

Standard nirkabel G 802.11g merupakan pengembangan dari 802.11b dengan laju kecepatan sampai 54 Mbps serta jangkauan yang lebih pendek. Beberapa jenis perangkat nirkabel *G* dikuatkan dengan teknologi yang bisa

mencakup area lebih luas seperti dengan penambahan antenna *grid* atau *flat panel*

Quality of Service

Quality of Service (QoS) merupakan metode pengukuran tentang seberapa baik jaringan dan merupakan suatu usaha untuk mendefinisikan karakteristik dan sifat dari suatu layanan [3]. QoS digunakan untuk mengukur sekumpulan atribut kinerja yang telah dispesifikasikan dan diasosiasikan dengan suatu servis. QoS didesain untuk membantu *end user* menjadi lebih produktif dengan memastikan bahwa *user* mendapatkan kinerja yang handal dari aplikasi-aplikasi berbasis jaringan. Diantara komponen-komponennya adalah *jitter*, *delay*, dan *loss packet*.

Jitter merupakan variasi *delay* antar paket yang terjadi pada jaringan berbasis IP. Besarnya nilai *jitter* akan sangat dipengaruhi oleh variasi beban trafik dan besarnya tumbukan antar paket (*congestion*) yang ada dalam jaringan tersebut. Semakin besar beban trafik di dalam jaringan akan menyebabkan semakin besar pula peluang terjadinya *congestion*, dengan demikian nilai *jitter*-nya akan semakin besar. Semakin besar nilai *jitter* akan menyebabkan nilai QoS semakin turun. Kategori kinerja jaringan berbasis IP dalam *jitter* versi *Telecommunications and Internet Protocol Harmonization Over Networks* (TIPHON) dikelompokkan menjadi empat kategori seperti terlihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Kategori Jitter

Kategori Degradasi	Peak Jitter
Sangat bagus	0 ms
Bagus	75 ms
Sedang	125 ms
Jelek	225 ms

Jitter dihitung dengan persamaan 1 :

$$\text{Jitter} = \frac{\text{Total Variasy Delay}}{\text{Total Packet yang diterima}} \dots\dots\dots (1)$$

Delay adalah waktu yang dibutuhkan oleh sebuah paket data terhitung dari saat pengiriman

oleh *transmistter* sampai pada saat diterima oleh *reciverer*. *Delay* dihitung dengan persamaan 2:

$$\text{Delay(Latency)} = \frac{\text{Jumlah waktu ping}}{\text{Banyaknya jumlah ping}} \dots\dots\dots(2)$$

Standar QoS Versi TIPHON untuk katagori *Delay (Latency)* ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Performansi jaringan berdasarkan *delay/latensi*

Kategori Latency	Besar Delay
Sangat Bagus	< 150 ms
Bagus	150 s/d 300 ms
Sedang	300 s/d 450 ms
Jelek	> 450 ms

Kualitas terbaik dalam pengiriman paket data ke tujuan adalah saat LAN/WAN memiliki jumlah paket yang hilang (*losses*) paling kecil [4].

Nilai *Packet loss* /Kongesti dapat dihitung dengan persamaan 3 :

$$Packet\ loss = \frac{Packet\ Transmitter - Paket\ Reciver}{Packet\ Transmitter} \times 100\% \dots\dots 3$$

Di dalam implementasi jaringan IP, nilai *packet loss* ini diharapkan minimum. Secara umum terdapat empat kategori penurunan performansi jaringan dengan versi TIPHON-

Telecommunications and internet protocol harmonization over networks [5], yaitu sebagai terlihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Performansi jaringan IP berdasarkan *packet loss*

Kategori Degredasi	Packet Loss
Sangat bagus	0
Bagus	3 %
Sedang	15 %
Jelek	25 %

METODOLOGI.

Metode yang digunakan adalah dengan memasang *Outdoor CPE (Customers Premises Equipment)* 2.4 Ghz Engenius 21611P di gedung 38 (IPSB3) sebagai *Acces Point* dan pemasangan *Outdoor CPE 2.4 Ghz UBNT NanoStation2* di gedung 51 Bidang Pengembangan Fasilitas Limbah (BPFL) sebagai *Client Bridge*. Konfigurasi sistem SCADA yang dipasang ditunjukkan pada Gambar 1.

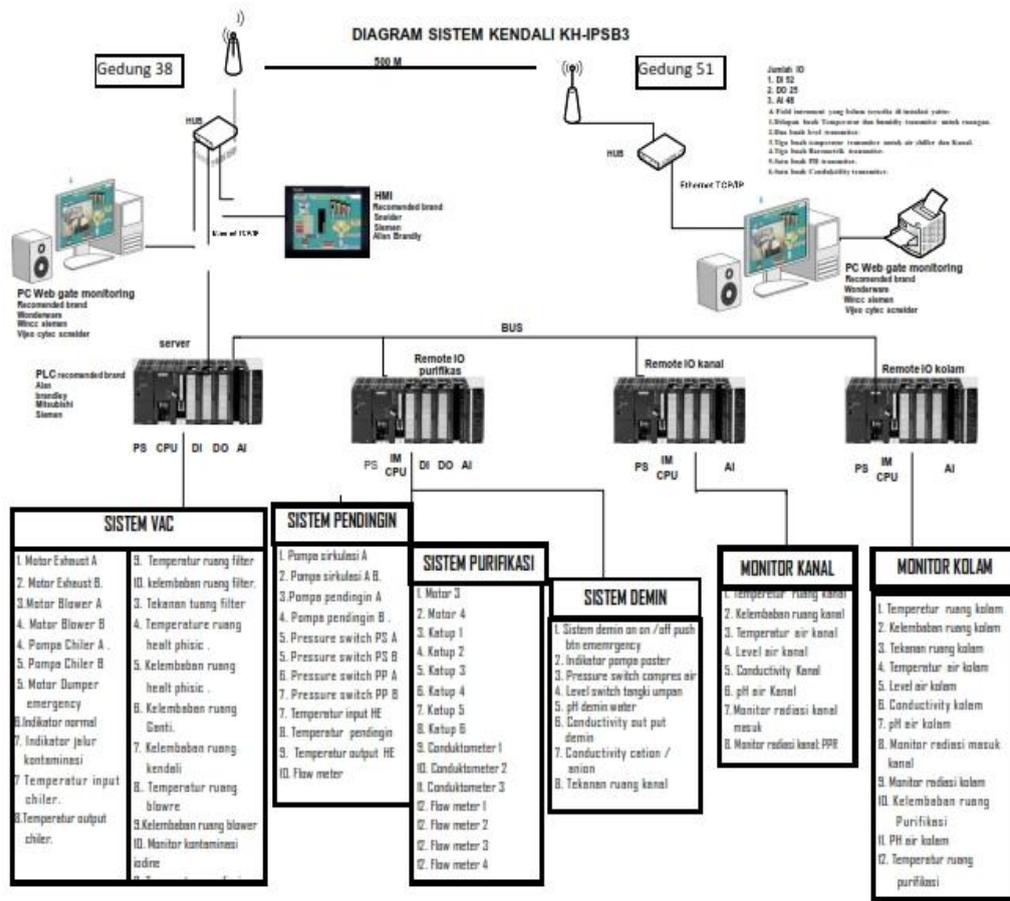
Pengujian dilakukan terhadap kualitas layanan jaringan dan pengujian aplikasi. Pengujian kualitas layanan jaringan dilakukan pada posisi komputer tersambung dengan *CPE Client Bridge* dengan menggunakan aplikasi *Ping.exe* buatan Microsoft. Pengujian meliputi kualitas layanan antar *CPE acces point* dan *CPE client Bridge*. Parameter kualitas layanan meliputi, *Delay(Latency)* dan *Packet Loss* dengan standar *Telecommunications and Internet Protocol Harmonization Over Networks*

(TIPHON) Pengujian Aplikasi dilakukan dengan *MTU-SCADA Software Simatic Wincc Flexible*.

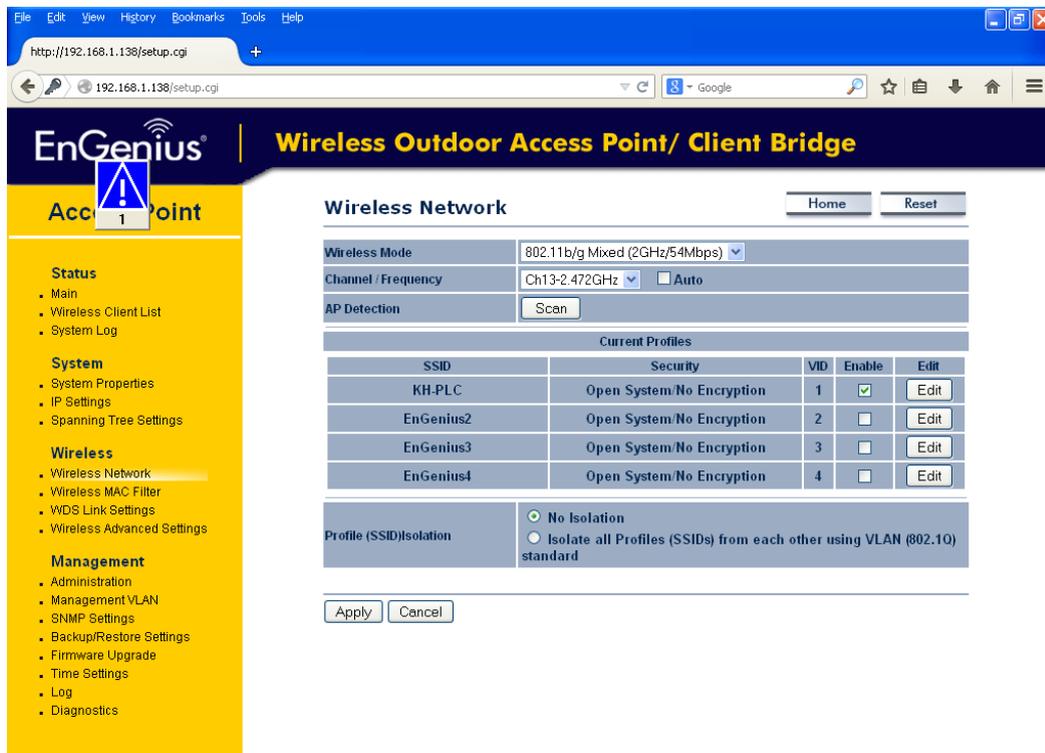
HASIL DAN PEMBAHASAN

Konfigurasi *Acces Point* Dan *Client Bridge*

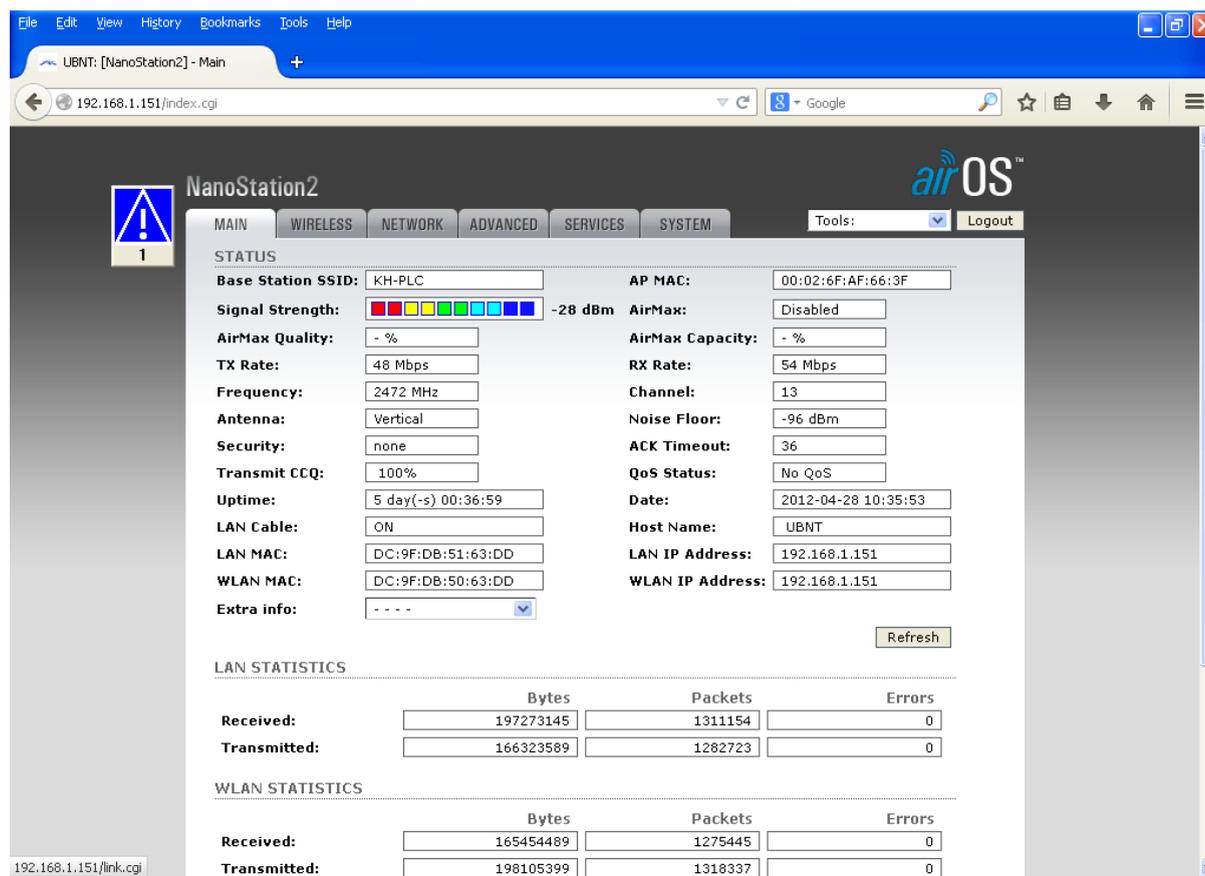
Hasil konfigurasi *Acces Point* dan *Client Bridge* di IPSB3 dapat dilihat pada Gambar 2 dan Gambar 3. Gambar 2 menunjukkan bahwa konfigurasi *CPE* Engenius ECB 2611P sebagai *accest point*, dengan IP 192.168.1.138, *SSID* KH-PLC. Frekuensi di atur pada posisi 2,472 Ghz atau *channel* 13. Dipilihnya frekwensi tersebut karena tidak banyak digunakan sebagai fasilitas *Hot Spot* di lingkungan sekitar Gedung 38. Sehingga meminimalkan adanya *interfrensi* signal antar *CPE- CPE* yang ada lingkungan sekitar.



Gambar 1. Konfigurasi Sistem SCADA



Gambar 2. Konfigurasi CPE EnGenius ECB 2611P di Gedung 38



Gambar 3. Konfigurasi CPE UBNT NanoStation2 di Gedung 51.

Gambar 3, menunjukkan konfigurasi CPE UBNT NNS2 yang ada di gedung 51 sebagai Client Bridgedengan IP 192.168.1.151. Konfigurasi menggunakan antenna internal sebagai penguat signal untuk meminimalkan gangguan signal latar (noise).CPE telah berhasil terhubung dengan acces point yang ada di Gedung 38 dengan TX maksimal 48 Mbps.Acces pointkemudian dihubungkan dengan unit RTU yang ada di gedung 38 dan perangkat client bridge UBNT NNS2 dihubungkan dengan komputer yang dilengkapi dengan MTU SCADA software Simatic Wincc Flexible beserta runtime filenya.

Pengujian QoS jaringan Nirkabel

Hasil uji Delay antar CPE di lokasi gedung 51 terhadap acces point yang ada di

Gedung 38 ditunjukkan pada Tabel 4. Pengujian dilakukan pada beban 1472 bytes waktu terendah 2 milisecond dan waktu tertinggi 15 milisecond. Delay dihitung dengan persamaan 2:

$$\begin{aligned}
 \text{Delay(Latency)} &= \frac{87 \text{ ms}}{20} \\
 &= 4.35 \text{ milisecond}
 \end{aligned}$$

Berdasarkan standar TIPHON, nilai delay 4,35 milisecond adalah termasuk dalam katagory latency “sangat bagus”, karena besar delay <150 ms. Sehingga dengan delay time 4,35 milisecond setiap perintah dari master terminal unit di gedung 51 akan cepat direspon oleh remote terminal unit yang ada di gedung 38, begitu juga sebaliknya setiap perintah dari master terminal unit akan direspon secara cepat oleh remote terminal unit.

Tabel 4. Uji Delay (latency)

Ping ke	Ping time (ms)	Ping ke	Ping time (ms)
1	3	11	3
2	4	12	3
3	5	13	3
4	3	14	2
5	2	15	14
6	2	16	15
7	3	17	3
8	3	18	2
9	3	19	2
10	9	20	3

Selain uji delay untuk mengetahui kecepatan respon jaringan, juga dilakukan uji packet loss. Hasil pengujian packet loss ditunjukkan pada Tabel 5. Data pengujian menunjukkan bahwa keseluruhan paket yang dikirim melalui jaringan tidak ada yang hilang artinya paket yang dikirim sama dengan paket yang diterima atau packet loss = 0%.

Berdasarkan standar TIPHON termasuk dalam katagori degradasi “sangat bagus”. Seluruh paket data yang berasal dari remote terminal unit di gedung 38 akan dikirim sempurna ke master terminal unit di gedung 51, begitu juga sebaliknya data dari master terminal unit akan dikirim sempurna ke remote terminal unit.

Table 5. Data Uji Packet Loss

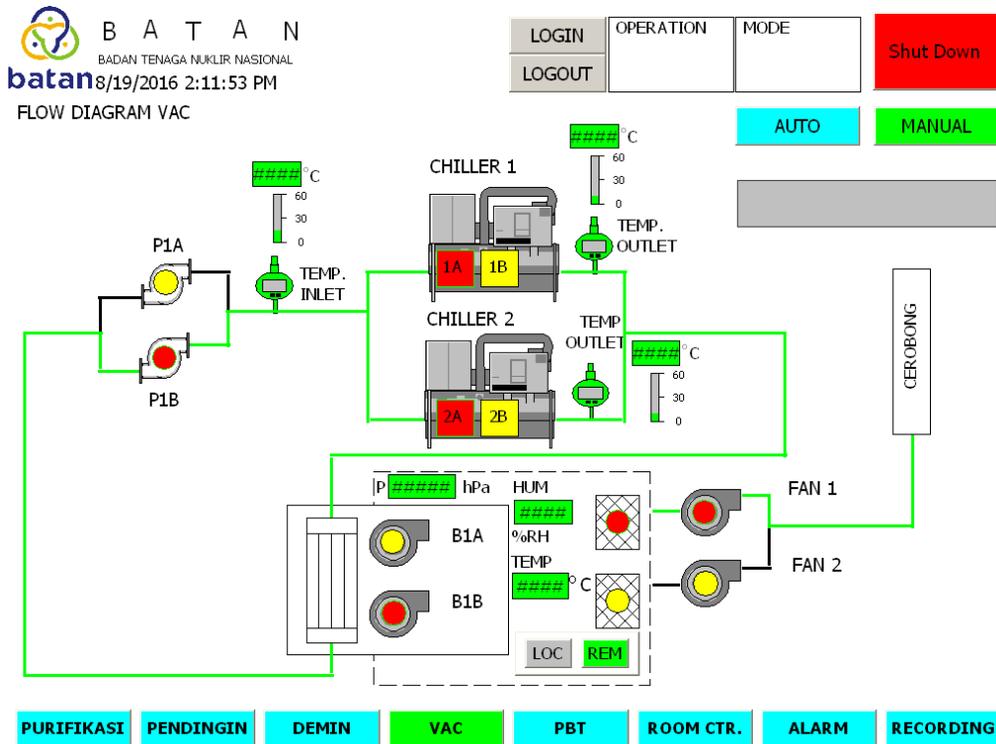
Ping ke	Ping time (ms)	Packet Loss	Ping ke	Ping time (ms)	Packet loss
1	3	0	11	3	0
2	4	0	12	3	0
3	5	0	13	3	0
4	3	0	14	2	0
5	2	0	15	14	0
6	2	0	16	15	0
7	3	0	17	3	0
8	3	0	18	2	0
9	3	0	19	2	0
10	9	0	20	3	0

Pengujian Aplikasi MTU-SCADA

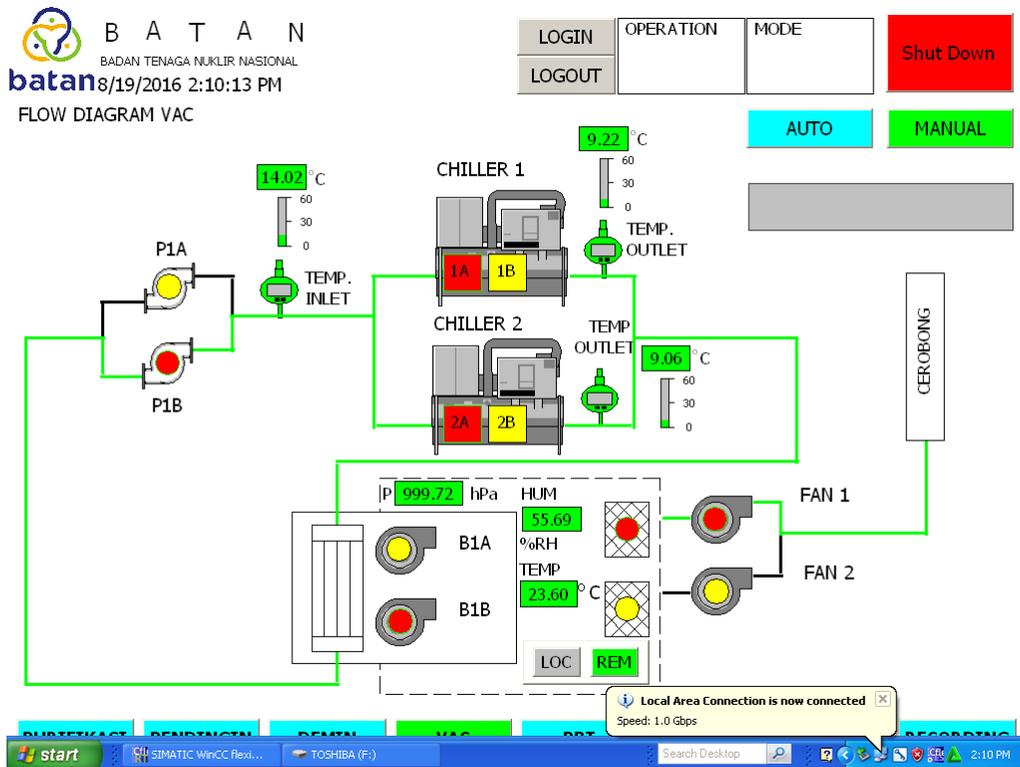
Pengujian aplikasi MTU-SCADA dilakukan untuk memastikan bahwa sistem SCADA dapat berfungsi dengan baik. Sistem SCADA yang menggunakan media komunikasi jaringan nirkabel 2,4 Ghz dapat menjalankan fungsinya dalam proses pemantauan, pengontrolan, pengambilan dan pengumpulan data-data kondisi operasi di IPSB3 dari MTU di gedung 51. Gambar pengujian layer panel pada kondisi offline dan Online ditunjukkan pada

Gambar 4 dan Gambar 5.

Gambar 4 adalah tampilan layer VAC Panel MTU-SCADA yang ada di gedung 51. Pada pengujian ini komputer MTU-SCADA terputus (offline) dengan CPE UBNT NNS2 sebagai client bridge. Walaupun file runtime nya dapat berjalan pada software Simatic Wincc Flexible tetapi tidak menampilkan ada data-data sistem ventilasi dari remote terminal unit yang ada di gedung 38, dengan ditandai simbol “#####”. Artinya bahwa sistem SCADA tidak dapat berfungsi.



Gambar 4. Layer Panel VAC offline



Gambar 5. Layer Panel VAC online

Gambar 5, adalah tampilan *layer* panel VAC MTU-Scada di gedung 51 dalam kondisi *online*. Pada pengujian ini perangkat jaringan nirkabel 2.4 Ghz difungsikan dan dihubungkan dengan komputer MTU SCADA. Terlihat bahwa data-data kondisi operasi sistem ventilasi yang ada di RTU di gedung 38 ditampilkan secara *online* dan *realtime* di komputer MTU-SCADA yang ada di gedung 51. Selain itu pengontrolan, pengendalian dan pengambilan data sistem ventilasi yang ada di gedung 38 dapat dilakukan di gedung 51 dengan sistem SCADA.

KESIMPULAN

Dari bahasan diatas dapat disimpulkan bahwa jaringan antara gedung 38 dan gedung 51 yang berjarak 500 meter dibangun menggunakan media nirkabel 2.4 Ghz dalam implemen. Jaringan telah memenuhi standar TIPHON dengan nilai *Delay (latency)* 4,35 *miliscond* katagori "Sangat Bagus" dan *packet loss* 0% juga termasuk dalam degradasi "sangat bagus". Aplikasi SCADA berfungsi dengan baik sehingga pengawasan, pengendalian dan akuisisi data (SCADA) untuk pengoperasian peralatan di IPSB3 gedung 38 dapat dilakukan secara baik dan

optimal dari gedung 51.

DAFTARPUSTAKA:

1. T.D.Purwanto, "Analisa Kinerja Wireless Radius Server Pada Perangkat *Access Point* 802.11g (Studi Kasus Di Universitas Binadarma)".
2. Szymanski, "Throughput and QoS Optimization in Nonuniform," 2008.
3. Muhammad Khoirul Umam, L. Budi Handoko, M.Kom "Analisis Kinerja Jaringan WLAN menggunakan metoda Action Research pada dinas Perhubungan Komunikasi dan Informasi Kabupaten Pematang". Program Studi Teknik Informatika S1, Fakultas Ilmu Komputer Universitas Dian Nusantoro
4. F. "Analisis Quality Of Service (Qos) Jaringan Lan Pada Universitas Bina Darma," 2011.
5. D.Sugianto, "Analisis Kualitas Layanan Jaringan Intranet(Qos) Di PT. Pelabuhan Indonesia (Persero) Palembang," 2013.

PEMBUATAN DAN PENGUJIAN *BURNER* PADA TUNGKU PELEBURAN TIMBAL UNTUK FABRIKASI *SHIELDING* SUMBER RADIOAKTIF BEKAS TERBUNGKUS

Arifin Istavara, Jonner Sitompul, Sugianto

Pusat Teknologi Limbah Radioaktif-Badan Tenaga Nuklir Nasional
Kawasan Puspipstek Serpong Gedung 50, Tangerang Selatan, Banten 15310
Email : istavara@batan.go.id

ABSTRAK

PEMBUATAN DAN PENGUJIAN *BURNER* PADA TUNGKU PELEBURAN TIMBAL UNTUK FABRIKASI *SHIELDING* SUMBER RADIOAKTIF BEKAS TERBUNGKUS. Telah dilakukan pembuatan dan pengujian *burner* pada tungku peleburan timbal dengan hasil *burner* layak digunakan untuk tungku peleburan dan telah diketahui kerja optimal karakteristik *burner* pada tekanan udara 0.75 bar dengan konsumsi bahan bakar oli bekas 1248 ml/jam, suhu cerobong 1041 °C, populasi lidah api 52 cm dan unjuk kerja pengkabutan stabil. Populasi asap belum dapat diukur karena keterbatasan alat.

Kata kunci : *burner*, oli bekas, lidah api, pengkabutan, peleburan timbal

ABSTRACT

MAKING AND TESTING OF THE *BURNER* FURNACE OF LEAD MELTING FOR FABRICATION OF DISUSED SEALED RADIOACTIVE SOURCES. The manufacturing and testing of the *burner* furnace of lead melting has been carried out with the resulted results *burner* that suitable to be used for use in melting furnaces and has been known the optimal work characteristics of the *burner* on the air pressure is 0.75 bar with a fuel consumption of waste oil in 1248 ml / hour, the temperature of flue 1041 °C, population flames 52 cm and atomizing performance is stable. Population smoke can not be measured because limitations of instrument.

Key word : *burner*, waste oil, flame, atomizing, lead melting

PENDAHULUAN

Pembuatan wadah sumber radioaktif bekas terbungkus atau biasa disebut DSRS (*Disused Sealed Radioactive Sources*) yang terbuat dari timbal (Pb) dirasa sangat baik untuk dilakukan karena mengingat biaya pembelian yang lebih mahal dibanding membuat produk sendiri. Selain itu desain wadah dapat disesuaikan dengan kebutuhan yang diinginkan. Untuk mencetak wadah DSRS ini perlu dibuat sebuah tungku peleburan timbal yang berfungsi untuk mencairkan timbal dan kemudian dicetak sesuai desain. Pada tungku peleburan perlu adanya *burner* sebagai alat untuk memasok panas yang dibutuhkan saat peleburan timbal di dalam tungku peleburan ini.

Burner yang dibuat berbahan bakar oli bekas dari hasil penggantian oli Generator-set pada Pusat Teknologi Limbah Radioaktif – BATAN yang setiap tahun dilakukan pemeliharaan serta penggantian oli baru. Pembuatan *burner* di Indonesia sebelumnya pernah dilakukan oleh Kamath BR [1], Ariawan Wahyu P [2], Mursito

[3], Firmandika dkk [4] dan lain-lain. Perbedaan dengan *burner* rancang bangun ini adalah pada desain dan jenis campuran bahan bakar.

Desain *burner* yang dibuat ini pada konsumsi bahan bakar hanya mengandalkan kekuatan hisap dari laju aliran tekanan udara dalam *burner*, dengan mekanisme pemecah dan penghalus butiran bahan bakar dengan mengatur rasio udara pada tekanan tertentu dan volume oli bekas, sehingga bisa mempermudah terjadinya pengkabutan dan pembakaran yang baik.

Pengujian *burner* dari desain ini bertujuan untuk mengetahui nilai optimal dari unjuk kerja rancangan *burner* ini, mulai dari kesetimbangan pengkabutan sampai dengan panas yang dihasilkan serta untuk menyempurnakan kekurangan unjuk kerja dari hasil pengujian.

DASAR TEORI

Ada beberapa macam *oil burner*, meskipun sama-sama berbahan bakar oli tetapi yang membedakan adalah sistem mekanik *burner*

dan campuran bahan bakar serta jenis aplikasi kebutuhan penggunaan, antara lain *Vaporizing burner*, *Mechanical atomizing burner*, *Oil pressure atomizing burner*, *Low pressure air atomizing burner* dan *High pressure steam or air atomizing burner* [5]. Jenis *burner* yang dibuat adalah jenis *low pressure air atomizing burner*. Desain ini dipilih karena kebutuhan suhu peleburan rendah, bahan mekanik mudah ditemui, mudah membuatnya dan bahan bakar tersedia banyak serta *continue*.

Proses pembakaran menggunakan bahan bakar cair harus diubah menjadi uap atau gas dan kemudian bahan bakar tersebut harus bercampur dengan udara (oksigen) untuk pembakaran. Penguapan bahan bakar cair dapat dilakukan melalui proses *atomizing/ pengabutan*, yaitu dengan membuat butiran cairan yang halus dalam fasa gas. Semakin kecil ukuran butiran cairan, maka proses penguapan akan semakin cepat, dan luas permukaan akan meningkat, mengakibatkan semakin banyak luas permukaan bahan bakar cair yang kontak dengan udara [6], sehingga nyala api akan mudah terjadi. Pembakaran yang baik memerlukan 5 (lima) syarat yaitu;

- a. Pencampuran reaktan secara murni, akan tetapi hal ini secara aktual tidak dapat terjadi sehingga diperlukan adanya udara tambahan (*excess air*)
- b. Pasokan udara yang cukup
- c. Suhu yang cukup untuk memulai pembakaran
- d. Waktu yang cukup untuk kelangsungan pembakaran
- e. Kerapatan/ densitas yang cukup untuk merambatkan nyala api [7].

METODE

Bahan

Bahan yang dipakai untuk membuat burner antara lain :

1. *Filler* tembaga
2. *Triple nipple outer drat size 1/4 inc*
3. *Tubing* tembaga *size 1/8 inc*
4. *Tube size 1/4 inc*
5. *Nozzel housing tube size 3/8 inc*
6. *Pipa outer drat size 2 inc*
7. *Dop pipa inner drat size 2 inc*

8. *Teflon cascade* pipa *size 1/4 inc*
9. *Forged nut size 1/4 inc* [8]

Pemasangan dan penggunaan dapat dilihat pada Gambar.1

Peralatan

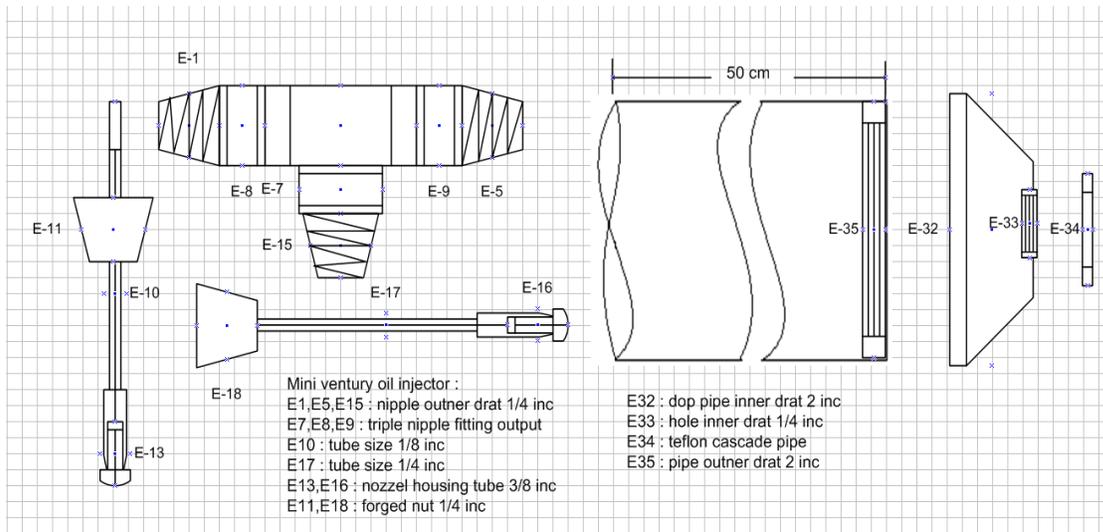
1. *Flaring tool* untuk mengembangkan ujung pipa tembaga agar dapat disambung dengan sambungan berulir (*flare fitting*).
2. *Swaging tool* untuk membesarkan ujung pipa, agar 2 (dua) pipa yang sama diameternya dapat disambung dengan *blasing/ las* tembaga.
3. Las asetilin untuk menyambung antar pipa dan *nozzle* modifikasi menggunakan *filler*.
4. Gerinda *cutting* untuk memotong pipa besi sebagai cerobong.
5. Kompresor untuk memasok udara.
6. Gelas ukur untuk mengetahui konsumsi bahan bakar.
7. *Tube cutting* untuk memotong *tubing* tembaga.
8. *Thermometer* untuk mengukur suhu pada cerobong *burner*

Tata Kerja

1. Penetapan Basik Desain *Burner*

- a. Observasi bahan
Observasi bahan dilakukan untuk mengetahui ketersediaan bahan di pasaran dan sebagai pertimbangan kemudahan dalam pengerjaan.
- b. Gambar teknis desain burner ditunjukkan pada Gambar 1

Perancangan dibuat dengan mempertimbangkan ketersediaan bahan yang mudah ditemui di pasaran dan mudah dalam pengerjaannya. Desain venturi untuk sistem *atomizing/ pengkabutan* bahan bakar pada *burner* ini berukuran mini dengan ukuran 3x3x1 cm, sistem pengkabutannya menggunakan pipa tembaga dibuat seperti jarum di dalam *triple nipple* tempat bertemunya bahan bakar cair dan udara.



Gambar.1 Gambar desain burner

2. Pengujian Burner

Langkah pertama pengujian dimulai dari menyiapkan oli bekas sebagai bahan bakar yang dihubungkan dengan selang ke *nozzele housing tube input* bahan bakar dan udara bertekanan yang dihubungkan dengan selang ke *nozzele housing tube input* udara dengan variasi tekanan dikontrol dengan *regulator* yang dilengkapi *pressure gauge*, sehingga variasi tekanan mudah untuk ditentukan.

Langkah ke dua mencari kesetimbangan pengkabutan agar api dapat menyala dengan stabil, yaitu dengan cara mengatur tekanan pada *regulator* sehingga oli tertarik menjadi campur dengan udara sehingga terjadi

pengkabutan, setelah terjadi pengkabutan diberi umpan api dari luar sesaat dengan menaikkan atau menurunkan tekanan sampai kabut bahan bakar menjadi terbakar. *Setting* kesetimbangan pengkabutan campuran bahan bakar dan udara ditunjukkan pada Gambar 2.

Langkah ke tiga mulai mengambil data dengan memasang *thermometer* digital dengan sensor suhu jenis RTD type N, sensor ini mempunyai rentang pengukuran dari 0 – 1250 °C [9]. Konsumsi bahan bakar diukur berdasarkan hisapan yang dapat dilihat dari gelas ukur dengan skala terkecil 2 ml. Populasi lidah api diukur dengan mistar dari ujung barner sampai ujung lidah api terjauh.



Gambar.2 *Setting* kesetimbangan pengkabutan campuran bahan bakar dan udara

3. Pengambilan Data

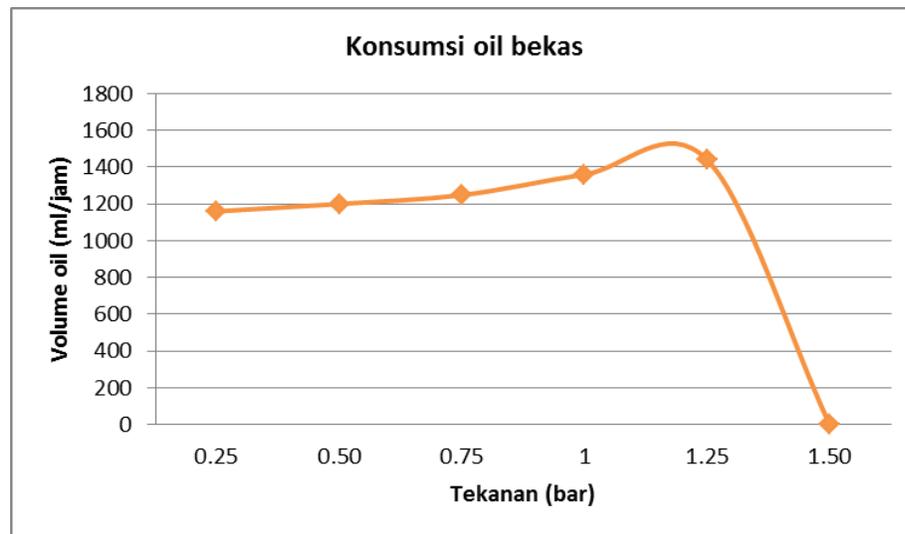
Pengambilan data bertujuan untuk menentukan nilai operasi optimal *burner* dan mencari kekurangan untuk menyempurnakan desain *burner* ini. Penentuan nilai optimal *burner* berdasarkan variasi tekanan udara dari 0.25 – 1.5 bar terhadap konsumsi bahan bakar, suhu dalam cerobong *burner*, populasi panjang lidah api, keberadaan asap dan pengamatan kesetimbangan pada pengkabutan.

Karakteristik *burner* hasil perancangan ini masih banyak kekurangan dan keterbatasan alat, dimana untuk membuat pengkabutan campuran bahan bakar dengan udara sementara yang dapat divariasikan hanya tekanan udara umpan

ke *burner*, untuk variasi bahan bakar yang bertekanan belum dapat dilakukan karena keterbatasan alat. Sehingga desain *burner* ini untuk aliran bahan bakar hanya mengandalkan sistem venturi dari desain *burner* tersebut.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengambilan data dengan variasi tekanan udara dapat diketahui karakteristik unjuk kerja optimal *burner*, yaitu dengan mengukur konsumsi bahan bakar (oli bekas), suhu pada cerobong *burner*, panjang populasi lidah api dan keberadaan asap. Hasil pengambilan data dari konsumsi bahan bakar rata-rata tiap variasi tekanan udara dapat dilihat pada Gambar.3 berikut.

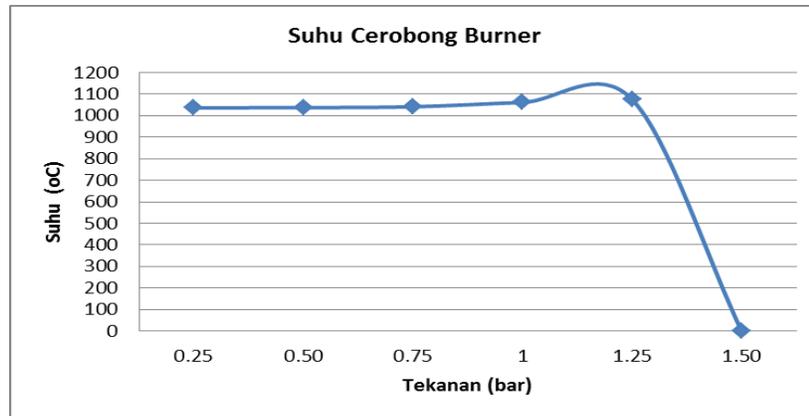


Gambar. 3 Konsumsi oli bekas pada *burner* terhadap tekanan udara

Pada Gambar. 3 diatas menunjukkan bahwa konsumsi bahan bakar semakin meningkat karena pengaruh penambahan tekanan udara. Pada tekanan udara 1.50 bar *burner* padam, ini dikarenakan unjuk kerja jarum pada venturi sebagai pemasok bahan bakar tidak mampu lagi mengimbangi laju udara yang dipasok oleh kompresor sebesar 1.50 bar, mengakibatkan kemampuan *burner* pada sistem pengkabutan bahan bakar yang tidak seimbang dengan laju udara yang dipasok dan venturi tidak mengalami kesetimbangan lagi karena

keterbatasan ruang venturi yang kecil serta dilewati hembusan udara bertekanan terlalu besar. Selain itu karakteristik kekentalan oli sebagai bahan bakar cair sangat penting dalam proses pembakaran, terutama pada proses pengabutan [10].

Pemantauan suhu yang dihasilkan oleh *burner* ini diukur didalam cerobong *burner*. Hasil pengambilan data dari suhu rata-rata tiap variasi tekanan udara dapat dilihat pada Gambar. 4 berikut.

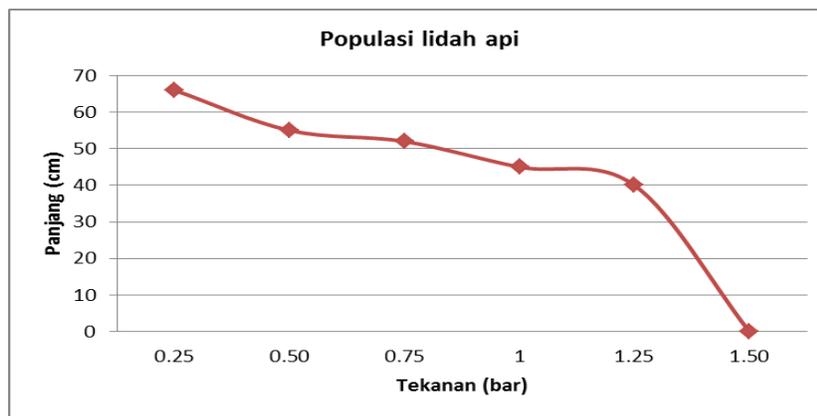


Gambar. 4 Suhu cerobong *burner* terhadap tekanan udara

Panas yang dihasilkan *burner* dengan variasi tekanan udara menunjukkan bahwa semakin tekanan udara ditambah maka semakin tinggi suhu yang dihasilkan, pada tekanan udara 1.50 bar

burner mati dan penyebabnya sama seperti pembahasan pada Gambar. 3 diatas.

Hasil pengambilan data populasi lidah api *output burner* terhadap tekanan udara ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Populasi lidah api *output burner* terhadap tekanan udara

Hasil pengambilan data dan pengamatan Gambar 5 ini didapat semakin besar tekanan udara, populasi lidah api semakin berkurang dan saat tekanan udara dinaikkan hingga 1.50 bar *burner* mati (Gambar 5). Panjang lidah api sangat dibutuhkan pada sistem tungku peleburan model silinder dengan pemanfaatan oli bekas sebagai bahan bakar, karena diharapkan dengan model tungku silinder lidah api dapat menjangkau sisi yang berlawanan arah dengan menghantarkan panas yang lebih merata. Api dalam tungku dibuat berbentuk *cyclon* agar seluruh permukaan cawan lebur/ kowi (*crucible*) dapat panas merata.

Pengujian menggunakan tungku peleburan didapat bentuk *cyclon* yang merata pada tekanan

0.75 bar dengan panjang lidah api rata-rata 52 cm dan dengan suhu cerobong *burner* rata-rata 1041 °C serta suhu pada tungku rata-rata 758 °C dengan kondisi tungku terbuka. Sehingga dari variasi tekanan udara diperoleh sesuai kebutuhan pada tekanan 0.75 bar, pada kegiatan ini hanya fokus mencari karakteristik hasil perancangan *burner* dan akan dilanjut dengan kegiatan berikutnya yaitu pengamatan serta perhitungan efisiensi tungku dan bahan bakar. Hasil populasi lidah api pada tekanan 0.75 bar dapat dilihat pada Gambar 6. Hasil pengamatan populasi asap dan pengabutan bahan bakar ditunjukkan pada Tabel 1.



Gambar 6. Lidah api *output* dari cerobong *burner*

Tabel 1. Hasil pengamatan populasi asap dan pengkabutan bahan bakar

No	Press (bar)	Asap	pengkabutan bahan bakar	Keterangan (lihat data Gambar 5)
1	0.25	ada	stabil	Lidah api cukup panjang dan ber asap
2	0.50	ada	stabil	Lidah api cukup panjang dan ber asap
3	0.75	tidak	stabil	Lidah api cukup panjang dan tanpa asap
4	1	tidak	stabil	Lidah api kurang panjang
5	1.25	tidak	tidak	Lidah api tidak stabil dan pendek
6	1.50	tidak	tidak	Lidah api tidak stabil cenderung mati

Karakteristik *burner* yang telah dibuat menunjukkan bahwa *burner* layak untuk digunakan pada tungku peleburan Timbal (Pb) yang akan digunakan untuk membuat wadah DSRS. Rancang bangun wadah DSRS ini akan segera dilakukan setelah rancang bangun tungku peleburan selesai sempurna dibuat.

KESIMPULAN

Unjuk kerja *burner* pada pembuatan dan pengujian *burner* ini menunjukkan bahwa *burner* layak digunakan dan telah diketahui unjuk kerja optimal *burner* pada tekanan udara 0.75 bar dengan konsumsi bahan bakar oli bekas 1248 ml/jam, suhu cerobong 1041 °C, populasi lidah api 52 cm dan unjuk kerja pengkabutan stabil. Perlu pengadaan alat ukur pendukung untuk pengambilan data populasi asap ini sehingga populasi asap dapat terukur dan tidak hanya sebatas pengamatan visual. Perlu adanya kegiatan lanjutan untuk menyempurnakan desain venturi pada sistem pengkabutan bahan bakar *burner* ini agar lebih optimal dengan output suhu yang tinggi, konsumsi bahan bakar rendah serta lidah api yang panjang dan setabil pada pengkabutan bahan bakarnya.

DAFTAR PUSTAKA

1. Kamath Bola R, Air Atomizing Oil Burner Utilizing A Low Pressure Fan And Nozzle, US 5921470 A, (1999)
2. Ariawan Wahyu Pratomo, Rancang Bangun Burner Berbahan Bakar Oli Bekas Untuk Pengecoran Kuningan, Jurnal Rekayasa Mesin vol.6, nomer 4, (2012)
3. Mursito, Rancang Bangun Burner Kompor Methanol Dengan Variasi Jumlah Lubang 16,20,22 Diameter Burner 9.5 cm dan Letak Lubang Zig-Zag. Skripsi, Universitas Muhammadiyah Surakarta, (2011)
4. Firmandika dkk, Rancang Bangun Burner Kompor Methanol Dengan Variasi Jumlah Lubang 16,20,22 Diameter Lubang 6 mm dan Diameter Burner 9.5 cm. Skripsi, Universitas Muhammadiyah Surakarta, (2011)
5. Rony Widhiasto, Pengaruh Tekanan Udara Terhadap Sifat Pembakaran Minyak Jelantah Menggunakan Vaporizing Burner Untuk Peleburan Aluminium, Skripsi, Universitas Sebelas Maret, (2010)

6. Borman, G. L. and Ragland, K.W. Combustion Engineering. New York, USA: McGrawHill. (1998)
7. Muin, S. Pesawat-Pesawat Konversi Energi I. Jakarta: CV. Rajawali, (1988)
8. Parker Hannifin Corp, Catalog 3501E, Michigan (2016)
9. Thermometrics corp data sheet RTD type N, California, (2012)
10. Crouse, W. H., & Anglin, D. L., Automotive Mechanics, 10th ed, McGraw-Hill International Editions, Singapore, (1993).

APLIKASI REACTOR PADA CAPACITOR BANK SEBAGAI PEREDAM HARMONIK CATU DAYA INSTALASI PENGOLAHAN LIMBAH RADIOAKTIF

Jonner Sitompul, Sugianto.

*Pusat Teknologi Limbah Radioaktif-Badan Tenaga Nuklir Nasional
Kawasan Puspiptek Serpong Gedung 50, Tangerang Selatan, Banten 15310
E-mail: jonner@batan.go.id*

ABSTRAK

APLIKASI REACTOR PADA CAPACITOR BANK SEBAGAI PEREDAM HARMONIK CATU DAYA INSTALASI PENGOLAHAN LIMBAH RADIOAKTIF. Terjadinya harmonik Arus dan harmonik tegangan listrik akibat pemakaian/konsumsi catu daya yang tidak merata atau secara tiba-tiba. Harmonik sangat mengganggu sistem jaringan catu daya dan peralatan-peralatan utilitas serta jaringan instrumen elektronik. Sebagai peredam harmonik arus dan peredam harmonik tegangan sistem catu daya Instalasi Pengolahan Limbah Radioaktif telah dipasang reactor capacitor bank pada tahun 2009. Untuk mengetahui fungsi dan aplikasi reactor sebagai peredam harmonik pada capacitor bank dilakukan analisa terhadap data pengamatan harian tahun 2013, 2014 dan 2015. Data yang dianalisa adalah nilai total harmonik arus dan nilai total harmonik tegangan dibandingkan dengan data standart. Hasil pengamatan harian total harmonik arus paling tinggi 1,3% dan nilai total harmonik tegangan paling tinggi 08,3%. Hasil pengamatan membuktikan bahwa aplikasi reactor capacitor bank berfungsi dengan baik dan aman sebagai peredam harmonik arus dan peredam harmonik tegangan catu daya Instalasi Pengolahan Limbah Radioaktif serta tidak melebihi nilai standart yang ditentukan IEEE Std 519-1992.

Kata Kunci : *Reactor capacitor bank sebagai peredam harmonic.*

ABSTRACT

REACTOR APPLICATION IN CAPACITOR BANK AS SILENCER HARMONIC AT POWER SUPPLY TO RADIOACTIVE WASTE TREATMENT PLANT. The occurrence of harmonic currents and harmonic electric voltage resulting from the use / consumption of power supply is uneven or suddenly. Very disturbing harmonic power supply network systems and devices as well as network utilities electronic instruments. As reducer harmonic current and voltage harmonic damper intalasi power supply systems have been installed Radioactive Waste Treatment reactor capacitor bank in 2009. To determine the function and application of harmonics on the reactor as a buffer capacitor bank to analyze the daily observation data in 2013, 2014 and 2015. The data analyzed were total harmonic current value and the value of total harmonic voltage is compared with the data standard. The results of daily observations highest total harmonic current 1.3% and the total value of the highest voltage harmonic 08.3%. The observation proves that the reactor capacitor bank applications to function properly and safely as reducer harmonic currents and harmonic dampening power supply voltage and the Radioactive Waste Treatment Plant does not exceed the specified standard IEEE Std 519-1992.

Keywords: *Reactor capacitor bank as harmonic filter.*

PENDAHULUAN

Kapasitor dipergunakan pada sirkuit elektronik untuk memblokir arus searah sementara memungkinkan arus bolak-balik untuk lolos. Untuk meningkatkan efektivitas pemakaian arus listrik, dipergunakan *capacitor bank* di panel utama *cosphy* (ϕ) dengan *capacitor bank* di panel utama, sehingga semua arus listrik yang dikonsumsi peralatan secara langsung *capacitor bank* akan memperbaiki *cosphy* (ϕ). Pusat Teknologi Limbah Radioaktif memasang *capacitor bank* dengan **metoda kompensasi umum** (jaringan *filter analog output*) yang diparalel dengan catu daya listrik terhadap panel utama 1-

10-001 (Main Distribution Panel)^[1]. Pemakaian listrik (catu daya) dalam skala insdustri pada umumnya banyak menggunakan motor-motor induksi yang dipastikan terjadi fluktuasi/resonansi (*harmonic*) arus listrik maupun tegangan. Hal ini juga bisa terjadi akibat beban secara menyeluruh karena tidak konstannya pemakaian. Peralatan yang disebut dalam istilah listrik untuk meredam tegangan yang tidak stabil disebut sebagai *stabilizer*. Untuk meminimalisir arus dan tegangan listrik yang sering berfluktuasi dari sumber atau pembangkit listrik, dipergunakan *reactor filter harmonic*. *Capacitor bank* umumnya terbuat dari

bahan *polypropylene film, gas-impregnated* tipe kering dengan menggunakan tiga sistem keselamatan[2]. *Capacitor bank* di Pusat Teknologi Limbah Radioaktif menggunakan model tiga fase dengan pola hubungan segitiga dan berpendingin udara (*indoor mounting*). Elektrolit padat, resin dicelup 10 uF 35 V kapasitor tantalum+. Tanda positif (+) menunjukkan kekurangan elektron.

Dalam sistem transmisi tenaga listrik, *filter harmonic* akan menstabilkan tegangan dan kekuatan aliran arus. Sebuah kapasitor (kondensor) adalah komponen listrik dua terminal pasif yang digunakan untuk menyimpan energi elektrostatik dalam medan listrik. Bentuk-bentuk kapasitor praktis dapat bervariasi, tetapi semua mengandung setidaknya dua konduktor listrik (pelat) yang dipisahkan oleh dielektrik yaitu *isolator*[3]. Konduktor dapat berupa film tipis, *foil* atau manik-manik sinter dari logam atau elektrolit konduktif, dll. Tindakan dielektrik dari *nonconducting* material untuk meningkatkan kapasitas muatan kapasitor. Sebuah dielektrik dapat terbuat dari kaca, keramik, film plastik, udara, vakum, kertas, mika, lapisan oksida dll. Kapasitor banyak digunakan sebagai bagian dari sirkuit listrik di banyak perangkat listrik umum. Tidak seperti *resistor*, kapasitor yang ideal tidak menghilangkan energi. Sebaliknya, kapasitor menyimpan energi dalam bentuk medan elektrostatik diantara piringnya[3].

Pengaruh *harmonic* pada *capacitor* termasuk pemanasan tambahan dan pada kasus yang berat *overloading*, peningkatan *stres dielektrik* atau tegangan, dan kerugian lain yang tidak diinginkan[4]. Juga, kombinasi *harmonic* dan *capacitor* dalam suatu sistem juga dapat menyebabkan kondisi kualitas daya yang lebih parah disebut *harmonic resonansi*, yang memiliki potensi kerusakan yang luas. Mengakibatkan timbulnya efek negatif yang akan memperpendek umur *capacitor*.

Kapasitor biasanya dipasang di sistem tenaga listrik komersial atau industri pada sistem distribusi atau transmisi sebagai perangkat koreksi faktor daya. Namun, meskipun merupakan komponen dasar dari sebuah filter harmonik (selain dari *reactor*), itu tidak bebas dari efek merusak dari *harmonic*. Dalam sistem tenaga ditandai dengan tingkat distorsi *harmonic* yang tinggi sehingga *capacitor bank* rentan terhadap kegagalan yang pada akhirnya alat akan mengalami kerusakan.

Pusat Teknologi Limbah Radioaktif menggunakan metode *global compensation* dengan kapasitas listrik 1455 Kva yang termasuk

golongan industri rendah dengan pola pemakaian beban listrik tidak terdistribusi secara merata, sehingga dengan memasang dua buah *capacitor bank* telah mampu mem-back-up seluruh peralatan yang ada di Instalasi Pengolahan Limbah Radioaktif maupun arus listrik di ruangan-ruangan administrasi.

Terjadinya *harmonic* (fluktuasi) arus dan tegangan dapat menyebabkan pemanasan yang berlebihan sehingga dapat mengurangi torsi motor dan generator. Peningkatan pemanasan akan merusak *capacitor* dan peralatan elektronik (*instrument*)^[5]. Sehingga *harmonic* dapat menyebabkan berkurangnya umur peralatan jika sistem yang dirancang tanpa mempertimbangkan besaran nilai dan frekwensi terjadinya *harmonic*. Untuk mengamankan motor induksi dari torsi yang besar dapat dilakukan dengan pemasangan peredam secara paralel dengan kumparan motor/generatornya, bentuk rangkaiannya dapat dilihat pada **Gambar 1**. Untuk itu sangat diperlukan pengukuran secara langsung besarnya torsi, *harmonic* proses penghidupan awal motor/generator untuk mengetahui batas harmonis yang ditentukan sesuai standart IEEE Std 519-1992 [6][7], dalam aplikasi sistem tenaga listrik. Bentuk rangkain pemasangan *capacitor bank* pada IPLR tidak menggunakan individual sistem seperti terlihat pada **Gambar 1**.

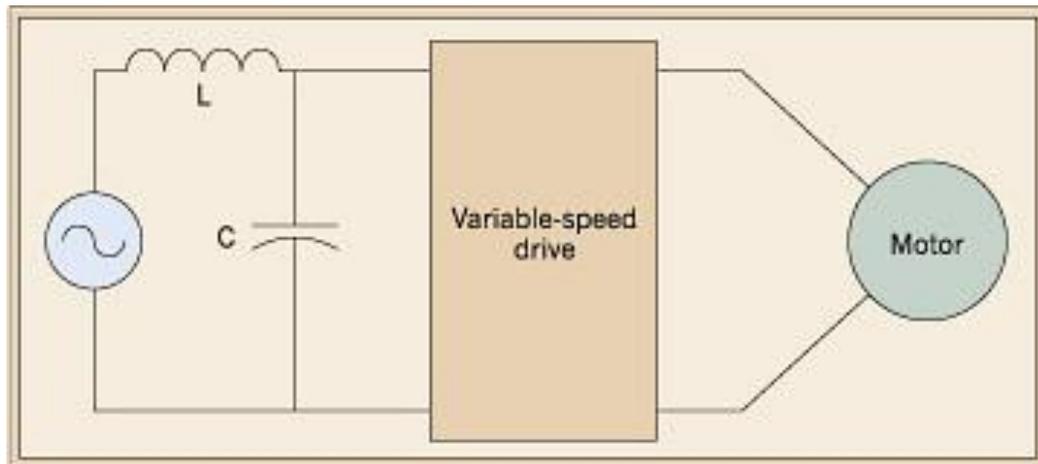
Harmonik Resonansi

Dalam pengoperasian peralatan-peralatan, khususnya motor/generator induksi tenaga besar akan terjadi *harmonic* resonansi. Efek ini membebankan tegangan dan arus yang lebih tinggi pada sistem tenaga atau catu daya listrik bagi pemasok maupun konsumen itu sendiri. *Harmonic resonance* yang biasa disebut resonansi harmonis dalam sistem tenaga listrik dapat diklasifikasikan sebagai paralel atau seri resonansi, dan kedua jenis resonansi akan terjadi di lingkungan yang kaya harmonik. Resonansi paralel menyebabkan perkalian sesaat, sedangkan resonansi seri menghasilkan tegangan pembesaran. Kerusakan besar untuk *capacitor bank* akan terjadi jika amplitudo frekuensi menyinggung cukup besar selama kondisi resonansi. Juga, ada kemungkinan besar bahwa perangkat listrik lainnya pada sistem juga akan rusak. Untuk itu pada Instalasi Pengolahan Limbah Radioaktif dilakukan pemasangan *reactor* sebagai *harmonic filter* pada *capacitor bank* dan untuk menjamin bahwa frekuensi resonansi yang terjadi tidak melebihi

nilai batas *harmonic* arus dan tegangan listrik yang dipersyaratkan IEEE Std 519-1992[6][7]

Secara umum, sistem listrik memiliki impedansi sumber yang rendah dan tegangan diatur dengan baik. Penyedia catu daya dapat mentolerir besarnya gangguan yang terjadi akan tetapi tidak melebihi nilai stabil pada frekwensi 50 - 60 Hz. Dalam hal itu termasuk nilai arus *harmonic* yang tanpa menyebabkan distorsi tegangan yang signifikan. Untuk jumlah yang diberikan arus *harmonic*, tegangan distorsi yang dihasilkan akan relatif kecil (kecuali situasi resonansi harmonis). Hal ini akan berguna untuk memahami tentang

harmonic dalam hal nilai persen dasar (baku/standart) untuk mendapatkan pemahaman tentang tingkat *harmonic* relatif dalam suatu sistem. Untuk pengoperasian pada peralatan Instalasi Pengolahan Limbah Radioaktif agar didapatkan batas aman, maka perlu dilakukan analisis *harmonic* sehingga pemasangan *reactor capacitor bank* sebagai *filter harmonic* menjadi penting. Sebagaimana umumnya *capacitor bank* lebih efektif agar menerima informasi *harmonic* dalam jumlah yang sebenarnya, volt atau ampere pada frekuensi yang berbeda[5].



Gambar 1. Pemasangan capacitor bank secara langsung pada motor induksi

Tegangan dan Batas *Harmonic Current*

Tegangan distorsi *harmonic* pada sistem tenaga (catu daya) selalu dibatasi untuk menjaga keamanan suatu instalasi maupun pemasok catu daya. Adanya *harmonic* arus dan tegangan yang tinggi (besar) pada jaringan distribusi konsumen maupun pada sumber penyedia akan

mengakibatkan sistem tenaga (catu daya) mengalami *trip* yang biasa disebut padam sesaat. Dalam ketentuan internasional dan telah diadopsi Indonesia ke dalam PUIL 2000 bahwa *Total Voltage Distortion* (THD) dibatasi sampai 5,0% dan *Individual Voltage Distortion* 3,0% dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Table 1. Batas tegangan harmonik[6][7]

<i>Bus Voltage at PCC</i>	<i>Individual Voltage Distortion (%)</i>	<i>Total Voltage Distortion THD (%)</i>
69 kV and below	3.0	5.0
69 kV through 161 kV	3.5	2.5
161 kV and above	1.0	1.5

Catatan: Sistem tegangan tinggi dapat memiliki hingga 2,0% THD, disebabkan adanya terminal *hight voltage direct current* (HVDC) yang disadap untuk pengguna.

Batas *harmonic* arus bervariasi berdasarkan pada kekuatan hubungan pendek dari sistem peralatan yang dipasang. Pada dasarnya, semakin sistem mampu menangani arus *harmonic*, semakin pelanggan diperbolehkan untuk pemanfaatan/mengoperasikan sistem peralatan dengan aman. Besarnya *harmonic* arus yang dapat ditoleransi pada suatu rangkain atau jaringan

distribusi konsumen maupun pada sumber penyedia harus sesuai dengan standart yang ditetapkan. Jaringan catu daya Instalasi Pengolahan Limbah Radioaktif berpatokan pada besarnya nilai *maximum harmonic current distortion* sesuai dengan batasan standart arus maksimum yaitu 15% (dapat dilihat pada **Tabel 2**).

Tabel 2. Batas Harmonik Arus untuk Sistem Distribusi Umum[6][7]

Maximum Harmonic Current Distortion in Percent of IL							
Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)							
No	Isc/ IL	<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	TDD
1.	<20*	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
2.	20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
3.	50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
4.	100<1000	10.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
5.	> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

TATA KERJA

Bahan/Peralatan, dan Waktu Penelitian

Bahan dan peralatan yang digunakan : bahan *reactor harmonic filter*, *capacitor bank* 25 kVArh, *capacitor bank* 5 kVArh, *cosphy* meter, *Polypropylene film*, *Gas-impregnated*, *isolator*, Modul *Power Factor Controller* BR6000^[1]. Pengamatan hasil pengoperasian *reactor capacitor bank* sebagai peredam *harmonic* arus dan tegangan listrik IPLR dilakukan di Utilitas Bidang Pengembangan Fasilitas Limbah, Pusat Teknologi Limbah Radioaktif, BATAN dari hasil data tahun 2013, 2014 dan tahun 2015.

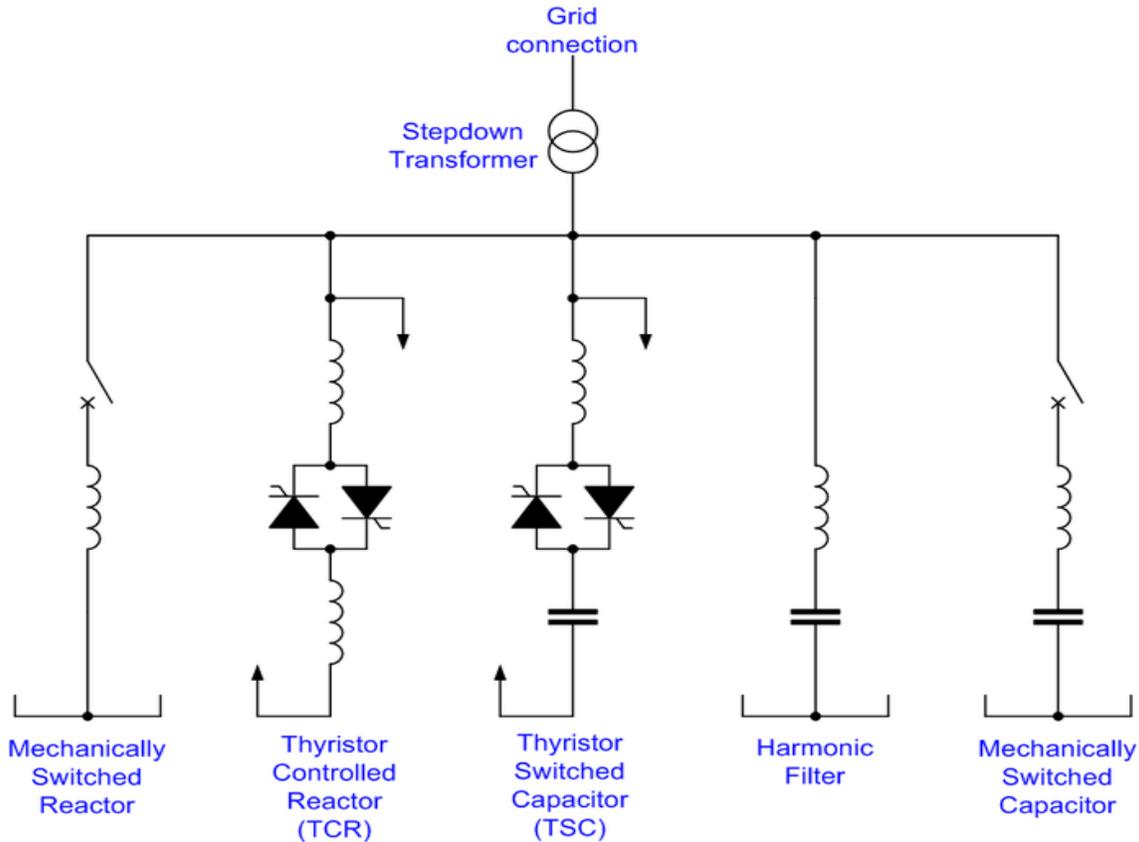
Metode Pengamatan

Pengamatan dilakukan setiap hari dengan membaca hasil penunjukan Modul *Power Factor Controller* BR6000 yang secara langsung ada di Panel *capacitor bank*. Setiap step yang beroperasi dan besaran-besaran lainnya di catat pada *logsheet* harian kemudian hasil satu bulan di rata-rata menjadi hasil pengamatan tiap bulan. Bentuk rangkaian pemasangan *reactor*, *capacitor bank* dan

harmonic filter IPLR dapat dilihat pada **Gambar 2**.

Prinsip Operasi Reactor

Thyristor-Controlled Reactor (TCR) berfungsi untuk mengendalikan arus yang bervariasi sehingga arus maksimum tidak melebihi batasan yang ditentukan pada standart. Arus maksimum juga ditentukan oleh tegangan koneksi dan induktansi reaktor. Supaya *harmonic* dapat mencapai hampir nol, diperlukan *reactor* sebagai filter atau pembatas. Filterisasi terjadi dengan memvariasikan penundaan dan menimbulkan kembali oleh *capacitor bank* yang disebutkan "memecat penundaan angle α ". Dimana α adalah sebagai sudut penundaan dari titik di mana tegangan menjadi positif ke titik di mana katup *thyristor* dihidupkan dan pada waktu tersebut arus listrik akan mengalir^{[4][5]}. Jadi arus maksimum diperoleh saat α adalah 90°, di mana titik TCR dikatakan dalam konduksi penuh. Saat tertinggal 90° tegangan akan balik sesuai dengan teori rangkaian AC klasik. Seiring dengan peningkatan α di atas 90°, sampai dengan maksimum 180°, kemudian menurun hingga menjadi terputus dan non-sinusoidal.



Gambar 2. Rangkaian reactor harmonic filter dan capacitor bank pada catu daya IPLR^[5].

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada Tabel 1 menunjukkan batas tegangan *harmonic* sedangkan **Tabel 2** menunjukkan batas *harmonic* arus sesuai standart IEEE Std 519-1992[6][7]. Batas *harmonic* arus menentukan jumlah maksimum arus *harmonic* yang dapat ditoleransi oleh pelanggan/pemakai ke dalam sistem catu daya. Penyedia sumber catu daya bertanggung jawab untuk menyediakan tegangan bersih kepada pelanggan. Jika tidak, pelanggan akan dianggap lalai karena menyebabkan tegangan distorsi sendiri. Maksud dan tujuan dari IEEE Std 519-1992 dinyatakan agar pelanggan catu daya dan penyedia dapat saling memahami pentingnya *harmonic* arus serta *harmonic* tegangan yang aman dalam jalur distribusi maupun pada pemakaian catu daya. Penerapan batas *harmonic* bertujuan untuk mencegah dari satu pelanggan menyebabkan masalah *harmonic* untuk pelanggan lain atau untuk penyedia catu daya atau sistem tenaga listrik^[5]. Jika memiliki *harmonic* yang tinggi dalam sistem peralatan itu sendiri, maka hanya akan merusak atau merugikan peralatan itu, namun tetap tidak

melanggar standart yang telah ditentukan dalam IEEE Std 519-1992[6][7].

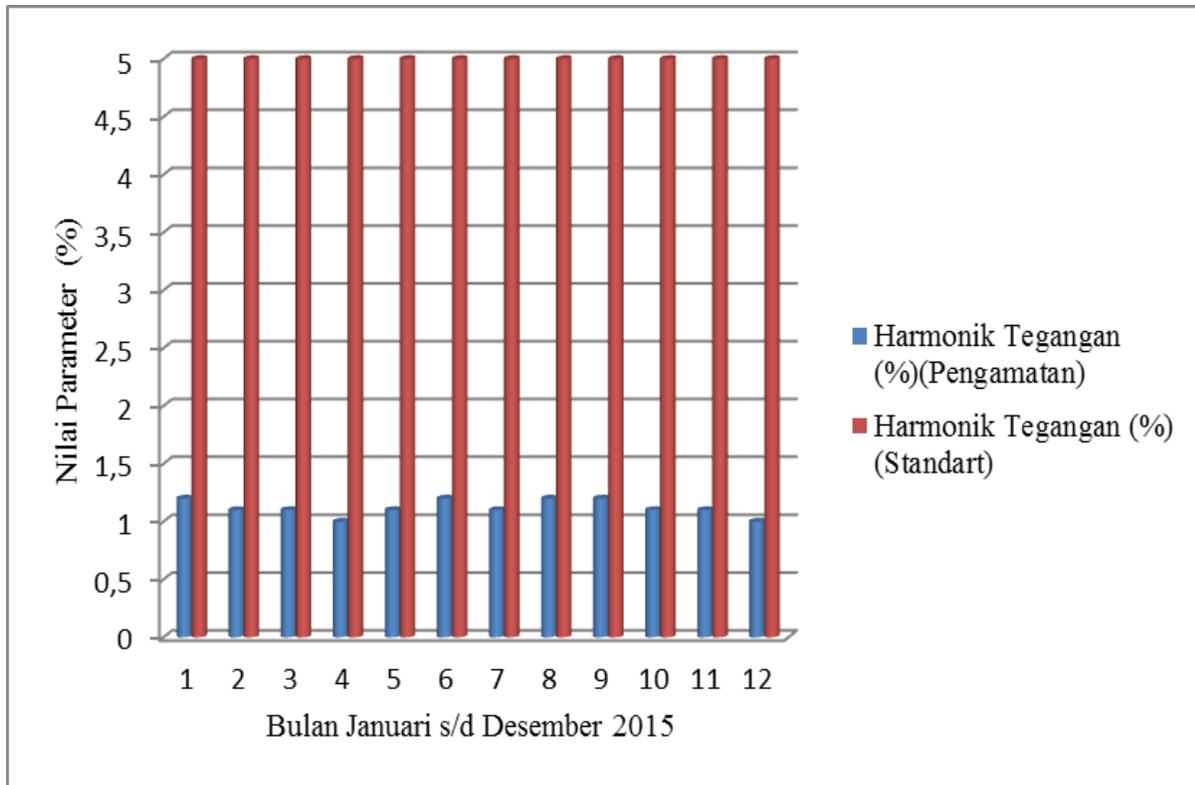
Pemasangan dan pengoperasian *reactor* sebagai *filter harmonic* pada *capacitor bank system* catu daya listrik Instalasi Pengolahan Limbah Radiaktif beroperasi secara penuh selama 24 jam. Modul *Power Factor Controller BR6000*^[2] akan berfungsi secara otomatis mengatur operasional setiap step *capacitor bank* pada kondisi operasi dan *stand-by* sesuai dengan kebutuhan pada kondisi *harmonic* arus dan kondisi *harmonic* tegangan listrik. Panel 1 terdiri dari 12 step yaitu step 1 sebesar 25 Kvar, step 2 sampai step 11 masing masing 50 Kvar dengan pola pemasangan 2 X 25 Kvar tiap step. Dan step 12 terdiri dari 5 Kvar yang dioperasikan secara manual untuk mengantisipasi kondisi kvar rendah. Panel 2 terdiri dari 10 step yaitu step 1 sebesar 25 Kvar, step 2 sampai step 9 masing masing 50 Kvar dengan pola pemasangan 2 X 25 Kvar tiap step. Dan step 10 juga terdiri dari 5 Kvar yang dioperasikan secara manual[2].

Dilakukan pengamatan terhadap hasil aplikasi *reactor* pada *capacitor bank* sebagai

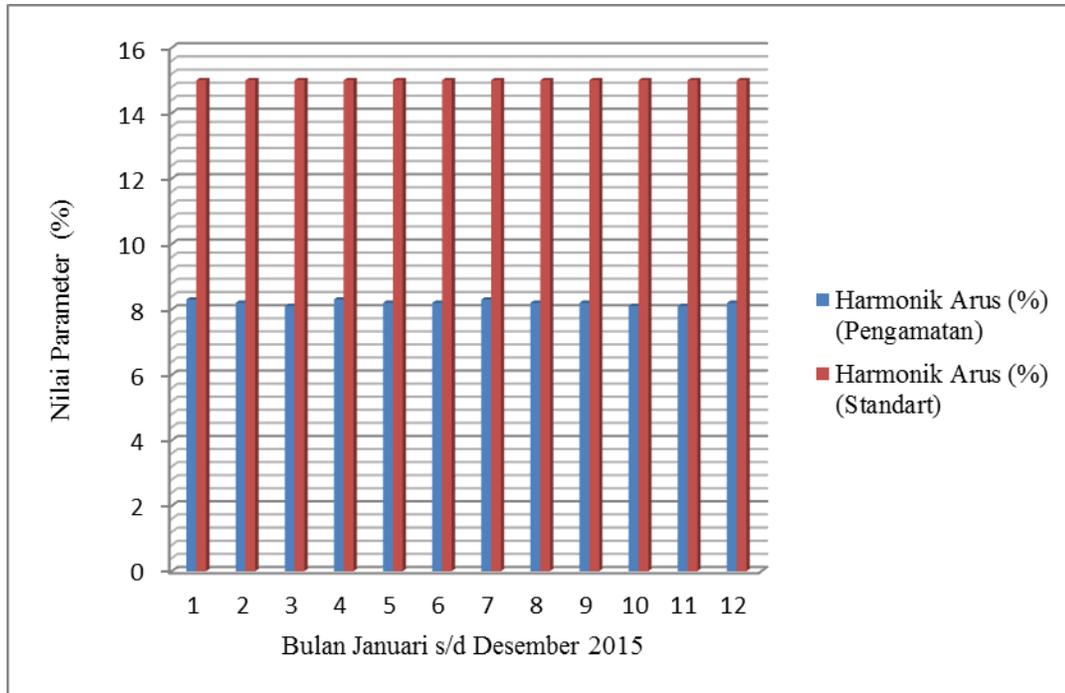
peredam *harmonic* catu daya Instalasi Pengolahan Limbah Radioaktif yang dicatat pada *logsheet* harian. Yang di analisa dalam makalah ini merupakan nilai pengamatan rata-rata tiap bulan dari hasil pengamatan tiap hari kerja pengoperasian *capacitor bank* tahun 2013, 2014 dan 2015 (**Tabel 3**). Nilai *maximum harmonic voltage distortion* tiap bulan pada pengamatan tahun 2013, 2014 maupun tahun 2015 rata-rata hanya sebesar 1,0% sampai 1,3% (lihat **Tabel 3**). Apabila dibandingkan dengan nilai standart yang merupakan batas *maximum harmonic voltage distortion* yang diizinkan 5% , nilai *maximum harmonic voltage distortion* IPLR relative sangat kecil apabila dibandingkan dengan nilai *standart* yang diizinkan sebesar 5% IEEE Std 519-1992^{[6][7]} (dapat dilihat pada **Tabel 1**). Dan nilai *harmonic current distortion* tiap bulan pada pengamatan tahun 2013, 2014 maupun tahun 2015 rata-rata hanya sebesar 8,1% sampai 8,3% (lihat **Tabel 3**). Apabila

dibandingkan dengan nilai *standart* yang merupakan batas *maximum harmonic voltage distortion* yang diizinkan 15% , nilai *maximum harmonic voltage distortion* IPLR relative sangat kecil apabila dibandingkan dengan nilai *standart* yang diizinkan sebesar 5% IEEE Std 519-1992^{[6][7]} (dapat dilihat pada **Tabel 2**).

Sebagai gambaran perbandingan bahwa nilai *harmonic* tegangan IPLR lebih kecil dari nilai *harmonic standart* lebih jelas juga dapat terlihat pada **Gambar 3**. Demikian juga nilai *harmonic* arus IPLR jauh di bawah nilai *harmonic* arus standart (**Gambar 4**). Hal ini membuktikan bahwa pengoperasian *reactor capacitor bank* sebagai *harmonic filter* arus dan tegangan pada Instalasi Pengolahan Limbah Radioaktif dapat berfungsi dengan baik. Sehingga pengoperasian Catu daya listrik Instalasi Pengolahan Limbah Radioaktif (IPLR) berfungsi dengan baik, aman dan sesuai dengan *standart* IEEE Std 519-1992^{[6][7]}.



Gambar 3. Hasil pengamatan *harmonic* tegangan dengan nilai standar.



Gambar 4. Hasil pengamatan *harmonic* arus dengan nilai standar

Tabel 3. *Harmonic* arus dan tegangan hasil pengukuran rata-rata tiap bulan tahun 2014 sampai 2015

No.	Parameter	Tahun	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1.	<i>Harmonic</i> Tegangan (%)	2013	1,2	1,0	1,2	1,1	1,1	1,2	1,2	1,1	1,3	1,1	1,1	1,0
2.	<i>Harmonic</i> Arus (%)	2013	8,1	8,2	8,1	8,1	8,3	8,2	8,2	8,3	8,2	8,1	8,2	8,1
3.	<i>Harmonic</i> Tegangan (%)	2014	1,1	1,2	1,1	1,2	1,0	1,2	1,3	1,2	1,1	1,2	1,0	1,2
4.	<i>Harmonic</i> Arus (%)	2014	8,2	8,1	8,2	8,1	8,2	8,3	8,1	8,1	8,3	8,3	8,2	8,1
5.	<i>Harmonic</i> Tegangan (%)	2015	1,2	1,1	1,1	1,0	1,1	1,2	1,1	1,2	1,2	1,1	1,1	1,0
6.	<i>Harmonic</i> Arus (%)	2015	8,3	8,2	8,1	8,3	8,2	8,2	8,3	8,2	8,2	8,1	8,1	8,2

KESIMPULAN

1. Nilai rata-rata tiap bulan total *harmonic* arus maksimal 1,3% dan total *harmonic* tegangan maksimal 8,3%.
2. Nilai *harmonic* tegangan dan nilai *harmonic* arus listrik jauh dibawah batas

- standart* IEEE Std 519-1992 sehingga pengoperasian peralatan-peralatan IPLR dapat dilakukan dengan baik.
3. *Reactor capacitor bank* sebagai peredam *harmonic* arus dan *harmonic* tegangan IPLR berfungsi dengan baik dan aman.

DAFTAR PUSTAKA

1. Maryudi, ST, “*Pengoperasian penunjang sarana Pusat Teknologi Pengembangan Limbah Radioaktif*”, 1990.
2. JONNER SITOMPUL, ST, “*Pengoperasian sistem capacitor bank Instalasi Pengolahan Limbah Radioaktif*” 2010.
3. PFRANKLIN, BENJAMIN “*Capacitor charging and discharging*”. *All about circuits*. Retrieved 2009-02-19.
4. SANKARAN, C. “*Effects of harmonics on power systems 1*” (1999).
5. CHAVEZ,C;HOUDEK,J.A. “*Dynamic Harmonic Mitigation and power factor correction*” (2007).
6. IEEE Std 519-1992. *Recommended practice and requirements for harmonic control in electrical power systems*.
7. IEEE Std. 18-2002, “*IEEE Standard for shunt power capacitors*”