

ISSN 1410-6086



PROSIDING

**SEMINAR NASIONAL
TEKNOLOGI PENGELOLAAN LIMBAH XV**

TEMA :

“Pengelolaan Limbah yang Inovatif, Handal, dan Berkelanjutan sebagai Wujud Kepedulian Terhadap Lingkungan”

**Dilaksanakan 26 September 2017
di Gedung Auditorium Pendidikan Vokasi UI**



Diterbitkan November 2017

DENYELENGGARA

**Dusat Teknologi Limbah Radioaktif - BATAN
dan
Sekolah Ilmu Lingkungan - UI**



ISSN 1410-6086

PROSIDING

SEMINAR NASIONAL

TEKNOLOGI PENGELOLAAN LIMBAH XV

TEMA :

“Pengelolaan Limbah yang Inovatif, Handal, dan Berkelanjutan sebagai Wujud Kepedulian Terhadap Lingkungan”

**Dilaksanakan 26 September 2017
di Gedung Auditorium Pendidikan Vokasi UI**



Diterbitkan November 2017

DENYELenggara

Dusat Teknologi Limbah Radioaktif - BATAN

dan

Sekolah Ilmu Lingkungan - UI



KATA PENGANTAR

Puji syukur kita panjatkan ke hadirat Allah SWT, karena atas karunia-Nya Prosiding Seminar Nasional Teknologi Pengelolaan Limbah XV dapat diterbitkan. Seminar ini terselenggara atas kerjasama antara Pusat Teknologi Limbah Radioaktif - BATAN dengan Sekolah Ilmu Lingkungan – Universitas Indonesia. Seminar dengan tema “Pengelolaan Limbah yang Inovatif, Handal, dan Berkelanjutan sebagai Wujud Kepedulian Terhadap Lingkungan” telah dilaksanakan pada tanggal 26 September 2017 di Gedung Vokasi Universitas Indonesia, Depok.

Seminar diselenggarakan sebagai media sosialisasi hasil penelitian dan pengembangan di bidang limbah radioaktif dan non radioaktif. Seminar Nasional Teknologi Pengelolaan Limbah XV 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, dan berkelanjutan dan sebagai wujud kepedulian terhadap 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 PUSARPEDAL, serta akademisi dari Universitas Indonesia, Universitas Gadjah Mada, Universitas Muhammadiyah Jakarta, dan STIKES Binawan.

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

Jakarta, Nopember 2017

Pusat Teknologi Limbah Radioaktif
Kepala,



Ir. Husen Zamroni

SUSUNAN TIM EDITOR

Ketua	: Dr. Budi Setiawan	- BATAN
Anggota	: 1. Dr. Sigit Santoso	- BATAN
	2. Dr. Heny Suseno	- BATAN
	3. Ir. Aisyah, MT	- BATAN
	4. Dr. Djoko Hari Nugroho	- BAPETEN
	5. Dr. Ir. Mohammad Hasroel Thayib, APU	- UI
	6. Dr. Hayati Sari Hasibuan, ST, MT	- UI

SUSUNAN PANITIA

Pengarah	:	1. Kepala Badan Tenaga Nuklir Nasional	-	BATAN
		2. Direktur Sekolah Ilmu Lingkungan - UI	-	UI
Penanggung Jawab	:	Ir. Husen Zamroni	-	BATAN
Penyelenggara				
Ketua	:	Budiyono, ST	-	BATAN
Wakil Ketua	:	Moch. Romli, S.ST, MKKK	-	BATAN
Sekretaris	:	1. Enggartati Budhy Hendarti, A.Md	-	BATAN
		2. Annisa Eskahita Azizah, S.ST	-	BATAN
		3. Wezia Berkademi, SE, M.Si	-	UI
Anggota	:	1. Sumarno	-	BATAN
		2. Sugianto, ST	-	BATAN
		3. Agustinus Muryama, ST	-	BATAN
		4. Ani Oktriani, S.St, M.Si	-	UI
		5. Eri Iswayanti, A.Md	-	BATAN
		6. Adi Wijayanto, ST	-	BATAN
		7. Arifin Istavara, ST	-	BATAN
		8. Yuli purwanto, A.Md	-	BATAN
		9. Nurul Hidayati, S.S	-	UI
		10. CH. Susiana Atmaja, A.Md	-	BATAN
		11. Imam Sasmito	-	BATAN
		12. Parjono, ST	-	BATAN
		13. Muhammad Muhsin, ST	-	UI
		14. Sariyadi	-	BATAN
		15. Sunardi, ST	-	BATAN
		16. Suparno, A.Md	-	BATAN
		17. Moh. Cecep Cepi H., M.Si	-	BATAN
		18. Purnomo, A.Md	-	BATAN
		19. Ade Rustiadam, S.ST	-	BATAN
		20. Irwan Santoso, M.Si	-	BATAN
		21. Ajrieh Setiawan, S.ST	-	BATAN
		22. M. Nurhasim, S.ST	-	BATAN

DAFTAR ISI

Halaman

KATA PENGANTAR		i
SUSUNAN TIM EDITOR		ii
SUSUNAN PANITIA		iii
DAFTAR ISI		iv
1.	Konsep <i>Dose Constraints</i> dan Masalah Penerapannya Yus Rusdian Akhmad	1
2.	Pengaruh Lepas TENORM pada Laju Dosis Radiasi di Sekitar PLTU Labuan, Banten Niken Hayudanti Anggarini, Megi Stefanus	9
3.	Studi Interrelasi Air Tanah dan Air Lindi di Sekitar TPST Piyungan Yogyakarta Erwin A. P. Gonti, Agus Budhie Wijatna, Satrio	17
4.	Infrastruktur Keselamatan Dekomisioning Fasilitas Nuklir di Indonesia Reno Alamsyah, Agus Yudhi Pristianto	29
5.	Penilaian Postur Kerja pada Proses Pengolahan Limbah Radioaktif di Pusat Teknologi Limbah Radioaktif dengan Metode <i>Reba</i> Atikah Safitri, Moch Romli	37
6.	Konsepsi <i>Reference Level</i> Nasional untuk Paparan yang Telah Ada Moekhamad Alfiyan	53
7.	Kajian Proses Daur Ulang Zat Radioaktif Terbungkus Cobalt-60 'yang Sudah Tidak Digunakan' untuk <i>Logging</i> Minyak dan Batubara Susilo Widodo, Suhaedi Muhammad, Rr.Djarwanti,RPS	57
8.	Studi Literatur "Pengukuran Laju Emisi Neutron (Fluens) dengan Sistem <i>Manganese Sulphate Bath (MnSO₄.H₂O)</i> " Nazaroh	63
9.	Distribusi Vertikal Radioisotop Alam ²¹⁰ Pb di Tanah pada Beberapa Lokasi Stabil Das Cisadane Nita Suhartini, Barokah Aliyanta	73
10.	Karakteristik Tapak Potensial Disposal Limbah Radioaktif Daerah Serang Banten : Konsentrasi <i>Naturally Occuring Radioactive Materials (NORM)</i> Sucipta, Risdiyana Setiawan, Dadang Suganda, Arimuladi Setyo Purnomo	83
11.	Pemantauan Radioaktivitas di Sekitar Reaktor Triga 2000 Bandung Juni Chussetijowati	93
12.	Performa <i>Subsurface Flow Constructed Wetland</i> Menggunakan Tanaman Melati Air dan Media Tanam Zeolit dalam Mengolah Limbah Cair Tambang Emas Rakyat Angge Dhevi Warisaura, Agus Prasetya	103

13.	Analisis Sistem Pengelolaan Sampah Kota (Studi Kasus: Kota Serang) Ricky Febriyanto	109
14.	Kualitas Limbah Domestik dan Partisipasi Masyarakat yang Peduli Lingkungan di Perumahan Permata Depok Klaster Mirah 1 dan 2 Melania Hanny Aryantie, Sri Unon Purwati, Oktaria Diah Pitalokasari	121
15.	Alternatif Pengolahan Limbah Industri Tempe dengan Kombinasi Metode Filtrasi dan Fitoremediasi Silvi Wahyu Puspawati	129
16.	Penentuan Potensi Kemampuan <i>Trichoderma, sp.</i> dalam Proses Degradasi Sampah Plastik Rumah Tangga Aidha Zulaika, Tri Edhi Budhi Soesilo, Nita Noriko	137
17.	Pengaruh Tegangan Listrik, Jarak Antar Elektroda dan Waktu Kontak Terhadap Penurunan Zat Warna <i>Remazol Red Rb</i> Menggunakan Metode Elektrokoagulasi Novie Putri Setianingrum, Agus Prasetya, Sarto	147
18.	Pengelolaan Limbah Radioaktif pada Unit Pelayanan Kedokteran Nuklir Diagnostik <i>In Vivo</i> Suhaedi Muhammad, Susyati, Rr.Djarwanti, RPS	157
19.	Profil Penyisihan Cs-137 dan Co-60 dalam Filtrat Limbah Kimia Radioaktif Cair dengan Proses Penukar Ion dan Koagulasi Sugeng Purnomo	163
20.	Pemantauan Radioaktivitas Dalam Air Hujan Tahun 2016 Leli Nirwani, R Buchari, Wahyudi dan Mujiwiyono	171
21.	<i>Assessment</i> Kelayakan Penyimpanan Sumber Radioaktif di PT. Gunanusa Utama <i>Fabricators</i> Cilegon - Banten Farida Tusafariah, Gloria Doloressa	179
22.	Konsentrasi Radioaktivitas Lingkungan dalam Partikulat Udara (<i>Pm10</i>) di Kawasan Nuklir Pasar Jumat (KNPJ). Leons Rixson, Megy Stefanus	187
23.	Study Awal Deteksi Mikronuklei pada Limfosit Pekerja Radiasi Medik Yanti Lusiyanti, Masnelly Lubis, Suryadi, Sri Sardini, Viria AS, Siti Nurhayati	195
24.	Penerapan Tingkat Klirens Pada Limbah Radioaktif Padat Terkompaksi di PTKMR-Batan Suhaedi Muhammad, Susyati, Eti Hartati,	201
25.	Aspek Radiologi pada Penyimpanan Hasil Pengondisian Zat Radioaktif Terbungkus yang Tidak Digunakan di Fasilitas Penyimpanan Sementara Limbah Aktivitas Tinggi (PSLAT) Suhartono, Muhamad Nurhasyim, Jati Eka Putri	207
26.	Kajian Analisis Pertumbuhan Bakteri Penyebab Bio-Korosi di Kolam Penyimpanan Bahan Bakar Nuklir Bekas Dyah Sulistyani Rahayu, Marhaeni Joko Puspito	215
27.	Analisis Radioaktivitas Air Pendingin di Fasilitas KH-IPSB3 Titik Sundari, Darmawan Aji	223
28.	Aspek Lingkungan dalam Penerapan Tingkat Klirens Limbah Radioaktif Moh. Cecep Cepi Hikmat, Moh. Hasroel Thayib, Dadong Iskandar	231

29.	Pengaruh Komposisi Barit dan <i>Fly Ash</i> Batubara Terhadap Sementasi Limbah Radioaktif Tri Sulistiyo Hari Nugroho, Susetyo Hario Putero, Kusnanto	239
30.	Kajian Pengolahan Limbah Radioaktif Padat dari Operasi Reaktor <i>High Temperature Reactor</i> 10 MW Mirawaty, Yuli Purwanto	247
31.	Evaluasi Hasil Analisis Efisiensi Kinerja Sistem Evaporator IPLR Tahun 2014-2017 Ajrieh Setyawan, Nurrandi Mayas Sujati	255
32.	Pengaruh Pemindahan Target Terirradiasi dari Reaktor ke PT.Inuki Terhadap Kualitas Air Kanal KH-IPSB3 Arifin, Titik Sundari, Darmawan Aji	261
33.	Studi Awal Audit Energi pada Gedung Pusat Sains Teknologi Bahan Maju – Badan Tenaga Nuklir Nasional Suyatno, Yana MK, Sairun	267
34.	Pengambilan Ion Perak dari Limbah Elektrolit Proses Oksidasi Elektrokimia Solven Organik Sutoto	277
35.	Evaluasi Pengolahan Limbah Radioaktif Cair Secara Evaporasi Bambang Sugito	283
36.	Unjuk Kerja Sistem Air Bebas Mineral untuk Pengolahan Limbah Radioaktif Jonner Sitompul, S.T, Sri Maryanto	289

KONSEP DOSE CONSTRAINT DAN MASALAH PENERAPANNYA

Yus Rusdian Akhmad

Badan Pengawas Tenaga Nuklir
Jl. Gajah Mada No.8, Jakarta Pusat 10120
y.rusdian@bapeten.go.id

ABSTRAK

KONSEP DOSE CONSTRAINTS DAN MASALAH PENERAPANNYA. *International Commission on Radiological Protection (ICRP)* memperkenalkan konsep *dose constraints (DC)* melalui ICRP Pub. 60 (1990). Konsep ini ternyata dalam penerapannya tidak dipahami dan diinterpretasikan secara homogen. DC sangat potensial disalahartikan sebagai nilai batas semacam Nilai Batas Dosis (NBD) baru kedua mengikuti evaluasi retrospektif daripada yang seharusnya yaitu sebagai evaluasi prospektif. Diusulkan alih bahasa dari DC yaitu Nilai Kendala Dosis (NKD) untuk menghindari penggunaan kata “batas” dan bermakna sebagai alat bantu dalam mengoptimalkan proteksi radiasi. Persetujuan NKD yang dipandang sebagai beban dan berlebihan merupakan tantangan bagi BAPETEN dalam menyikapi nilai-nilai setempat secara arif. Untuk memenuhi kebutuhan ini IAEA telah menerbitkan SF-1 yang menyatukan falsafah proteksi radiasi, keselamatan nuklir dan pengelolaan limbah sehingga interaksi nilai-nilai setempat dengan nilai-nilai SF-1 menjadi produktif untuk kepentingan masyarakat luas tidak hanya dalam masalah NKD tetapi banyak hal lain termasuk introduksi PLTN di Indonesia. Aplikasi tenaga nuklir dan radiasi pengion harus bermanfaat, selamat, dan beretika. Konsep NKD dimaksudkan agar keadilan dalam hal penerimaan dosis dapat dipenuhi sesuai nilai-nilai setempat. Tujuan makalah ini yaitu membahas masalah NKD berdasarkan perspektif ilmiah dan etika sebagaimana disarankan oleh ICRP yang berkompeten dan “melahirkan” konsep tersebut agar dalam penerapannya diperoleh penerimaan risiko-manfaat yang seadil-adilnya. Telah diperoleh berbagai pemahaman dan kesimpulan terkait NKD yang bermanfaat bagi penguatan pengawasan pemanfaatan tenaga nuklir di tanah air secara umum dan secara khusus untuk implementasi PERKA BAPETEN tentang Proteksi dan Keselamatan Radiasi dalam Pemanfaatan Tenaga Nuklir.

Kata Kunci : *optimization, planned exposure situation, dose constraints*

ABSTRACT

DOSE CONSTRAINTS CONCEPT AND IMPLEMENTATION ISSUES. *International Commission on Radiological Protection (ICRP)* introduced the concept of *dose constraints (DC)* in the ICRP Pub. 60 (1990). In its application this concept is not uniformly understood and interpreted. The DC is potentially misunderstood as a kind of second new limit as Dose Limit that has a meaning as retrospective evaluation rather than should follow a prospective evaluation. This work proposed that DC is translated as Nilai Kendala Dosis (NKD) to avoid using the word "limit" and serves as a tool in optimizing radiation protection. The DC approval has been seen as a burden and a redundant is a challenge for BAPETEN to wisely respond to local values. To meet this need the IAEA has published SF-1, it unified the philosophy of radiation protection, nuclear safety and radioactive waste management, that the interaction of local values with these values be productive for the public interest not only in the matter of DC but also many other things including introduction of nuclear power plants in Indonesia. The application of nuclear energy and ionizing radiation must be useful, safe, and ethical. The NKD concept is intended for justice in the acceptance of doses to be met according to local values. The purpose of this paper is to discuss the NKD problem based on scientific and ethical perspectives as suggested by the ICRP which is competent and "give birth" to the concept in order to achieve the fair acceptance of benefit-risks. The paper presents the insights and conclusions related dose constraints for the benefit of strengthening the regulatory control of the utilization of nuclear energy in the country in general and specifically for implementing BAPETEN Chairman Regulation on Radiation Protection and Safety in the Utilization of Nuclear Energy.

Keywords : *optimization, planned exposure situation, dose constraints*

PENDAHULUAN

International Commission on Radiological Protection (ICRP) secara formal memperkenalkan konsep *dose constraints* melalui ICRP Pub. 60 pada tahun 1990. Konsep ini ternyata dalam penerapannya tidak dipahami dan diinterpretasikan secara homogen seperti yang terjadi dalam penyiapan standar internasional untuk proteksi radiasi, yaitu BSS-115, yang diprakarsai oleh *International Atomic Energy Agency (IAEA)*[1]. Walaupun pada akhirnya Publikasi ICRP dan Publikasi IAEA menjadi harmonis, penerapannya di berbagai

Negara ternyata tidak sesuai dengan yang diharapkan oleh ICRP dan IAEA [2]. Hal ini tidak membuat ICRP dan IAEA merevisi atau menghilangkan konsep *dose constraints (DC)* yang menuai salah pengertian dalam penerapannya tetapi justru dalam publikasi mutakhir ICRP Pub. 103 dan IAEA GSR Part 3 penjelasannya semakin diperkuat [3,4].

Di Indonesia konsep ini telah diadopsi dan dinamakan ‘Pembatas dosis’ melalui penerbitan PP No. 33 Tahun 2007 tentang Keselamatan Radiasi Pengion dan Keamanan Sumber Radioaktif [5]. Sejak

penerbitannya, Pembatas dosis belum dilaksanakan dan dengan memperhatikan narasi dari pasal-pasal terkait, maka Penulis berpandangan bahwa potensi salah pengertian cukup tinggi. Selain itu, saat ini berlaku PERKA No.4 Tahun 2013 tentang Proteksi dan Keselamatan Radiasi dalam Pemanfaatan Tenaga Nuklir. PERKA ini merincikan persyaratan terkait Pembatas dosis sebagaimana diamanatkan oleh PP No. 33 [6]. Berdasarkan pasal-pasal yang terkait Pembatas dosis, Penulis berpandangan bahwa PERKA ini juga berpotensi untuk menimbulkan salah pengertian bahkan lebih tegas daripada PP No. 33 bila dilihat dari pandangan ICRP dan IAEA.

Peraturan Pemerintah No. 33 menyatakan dirinya menyesuaikan dengan BSS-115. Oleh karena itu agar harapan tersebut dapat terwujud, Penulis bermaksud menyajikan pembahasan konsep *DC* dan masalah penerapannya karena telah cukup tersedia pustaka yang membahas mengenai *DC* yang dipublikasikan oleh institusi yang berkompeten termasuk hasil dari pengamatan Penulis selama ini terhadap praktik proteksi radiasi di Indonesia.

Masalah yang akan dibahas meliputi sedapat mungkin memperoleh pengertian *DC* menurut pandangan ICRP dan IAEA termasuk menganalisis penerapannya di Indonesia. Dalam hal penerapan ini, karena *DC* dimaksudkan untuk menjadi alat bantu dalam proses mengoptimalkan dosis individu, yaitu agar penerimaan dosisnya serendah mungkin yang dapat dicapai secara wajar dengan mempertimbangkan faktor sosial dan ekonomik, maka permasalahannya selain membutuhkan pertimbangan ilmiah (*scientific*) juga tidak lepas dari pertimbangan nilai-nilai setempat (*value judgement*). Peran penting *DC* yaitu menjadi “kendala dosis” agar dalam proses ini tidak muncul kesenjangan (ketidakadilan) dosis individu di dalam distribusi yang mewakili suatu kelompok maupun kesenjangan antar kelompok sejenis (setara) jika dibandingkan dengan dosis rata-rata atau normal untuk suatu sumber atau suatu kegiatan.

Dengan demikian rumusan masalahnya yaitu menyajikan pembahasan tentang *DC* dari perspektif keadilan (distribusi dosis individu) dengan mengandalkan pertimbangan ilmiah tetapi tidak sama sekali lepas dari bayangan pertimbangan nilai-nilai setempat sehingga diperoleh berbagai pemahaman dan kesimpulan terkait *dose constraint* yang bermanfaat bagi penguatan pengawasan pemanfaatan tenaga nuklir di tanah air secara umum dan secara khusus untuk masukan penerapan PERKA BAPETEN tentang Proteksi dan Keselamatan Radiasi dalam Pemanfaatan Tenaga Nuklir yang sangat diperlukan.

METODOLOGI

Proteksi radiasi mencakup bukan hanya masalah sains, tetapi juga falsafah dan etika [3,4,7]. Konsep NKD berdasarkan penjelasan dari pustaka yang dipublikasi ICRP dan IAEA dibahas dengan mempertimbangkan nilai (kearifan) nasional. Diharapkan dengan cara ini dicapai tujuan pembahasan masalah NKD berdasarkan perspektif ilmiah dan etika yaitu agar dalam penerapan peraturan yang mengamanatkannya untuk mengawasi penggunaan tenaga nuklir dan/atau radiasi pengion diperoleh situasi penerimaan risiko-manfaat yang seadil-adilnya.

Mengapa DC dibutuhkan

Dalam merancang suatu situasi paparan terencana akan tersedia berbagai skenario yang dapat mengarahkan pada berbagai opsi dosis atau distribusi dosis individu sesuai dengan pengetahuan dan pengalaman untuk suatu sumber atau suatu kegiatan yang sedang diperhatikan. Terjadinya penetapan opsi yang tidak dapat diterima (tidak adil) pada distribusi dosis individu dalam proses optimisasi ini sangat memungkinkan karena manfaat dan kerugian (beban) tidak mungkin terdistribusi ke suatu kelompok masyarakat dengan cara yang sama [3]. Konsekuensi dari kenyataan ini mengarahkan kita pada pandangan bahwa munculnya suatu opsi dalam perencanaan dari penerapan optimisasi yang dapat mengakibatkan penerimaan dosis tidak wajar adalah mungkin dan karenanya perlu diberikan kendala-kendala untuk menolaknya. Pandangan ICRP 103 mengenai hal ini dinyatakan sebagai berikut:

“The concept of dose constraints was introduced in Publication 60 as a means of ensuring that the optimization process did not create inequity, i.e., the possibility that some individuals in an optimized protection scheme may be subject to much more exposure than the average: “Most of the methods used in the optimization of protection tend to emphasize the benefits and detriments to society and the whole exposed population. The benefits and detriments are unlikely to be distributed through society in the same way. Optimization of protection may thus introduce a substantial inequity between one individual and another. This inequity can be limited by incorporating source-related restrictions on individual dose into the process of optimization. The Commission calls these source-related restrictions dose constraints, previously called upper bounds. They form an integral part of the optimization of protection. For potential exposures, the corresponding concept is the risk constraint.” (ICRP, 1991b)”. This statement continues to represent the Commission’s view (ICRP--103)”.

Sesungguhnya sejak konsep optimisasi secara formal diperkenalkan melalui ICRP 26 pada tahun 1977, kebutuhan semacam DC juga ada, hanya saja pada waktu itu peran ini dijalankan oleh nilai batas dosis (NBD) itu sendiri yang ketika itu dipandang sudah tidak memadai jika diandalkan sebagai instrumen kepatuhan proteksi radiasi [1]. Karena kepatuhan terhadap NBD dipandang tidak memadai konsep optimisasi proteksi diperkenalkan melalui ICRP 22 pada tahun 1973 dan secara formal dengan ICRP 26 pada tahun 1977. Seiring dengan itu diperkenalkan pendekatan untuk perlindungan dan penilaian terkait-sumber dan kebutuhan memperkenalkan “pembatasan” dosis individu yang berasal dari suatu sumber tertentu.

Dalam hal konsep NBD, ia memiliki makna *prospective* untuk perencanaan dan makna *retrospective* untuk memeragakan kepatuhan terhadap batasan hukum. ICRP 60 mendefinisikan kembali konsep NBD sebagai batasan terendah untuk risiko yang tidak dapat diterima. Dengan definisi ini, NBD tidak dapat dipandang memadai membatasi ketidakadilan yang mungkin dalam distribusi dosis individu yang dihasilkan dari suatu proses optimisasi proteksi. Oleh karena itu konsep DC diperkenalkan. Dengan analogi yang sama, konsep *risk constraint* juga diperkenalkan untuk kebutuhan pengendalian *potential exposures*.

Pengertian dan Peran DC

Untuk sedapat mungkin menangkap pengertian DC, di sini penulis mengusulkan alih bahasa dari *dose constraints* yaitu menjadi “kendala dosis”. Dengan cara ini diperoleh dua istilah penting yang saling melengkapi untuk tujuan pembahasan proteksi radiasi yaitu NBD untuk nilai batas dosis dan NKD untuk nilai kendala dosis; kata mengandung ‘batas’ tidak digunakan dalam alih bahasa di sini untuk *constraints* karena sudah diberikan kepada *dose limit* yang bermakna *retrospektif* dan *prospektif* termasuk agar tidak disalahartikan menjadi nilai batas baru (kedua) setelah NBD.

Pertimbangan utama proteksi radiologik yaitu melindungi terhadap radiasi dalam situasi yang sesuai, sehingga pemaparan yang dihasilkan menjadi serendah mungkin yang dapat dicapai secara wajar dengan mempertimbangkan faktor ekonomi dan sosial. Dengan perkataan lain yaitu ditempuh melalui penerapan prinsip optimisasi. Optimisasi merupakan upaya sungguh sungguh secara wajar yang dapat ditempuh melalui salah satu atau kombinasi dari pendekatan intuisi-kualitatif dan komputasi-kuantitatif. Salah satu pustaka penting dari IAEA yang dapat membantu pemahaman pernyataan ini yaitu Pustaka [8] yang membahas “*the reference monetary value of*

the man-sievert” untuk keperluan pengujian secara kuantitatif tingkat kewajaran suatu biaya optimisasi yang diusulkan.

Untuk membantu perencanaan perlindungan yang optimal dalam situasi paparan terencana, ICRP menganjurkan penggunaan NKD. Secara umum, NKD adalah suatu nilai yang semua dosis terencana harus dipertahankan berada di bawah nilai tersebut. NKD tersebut berkaitan dengan “sumber” tertentu, dan tidak boleh ditafsirkan sebagai batas dosis. Memilih nilai numerik NKD untuk sumber tertentu bukan tugas mudah, tetapi perlu pengetahuan, pengalaman dan pertimbangan yang menyeluruh baik untuk suatu sumber dalam situasi paparan yang direncanakan atau satu himpunan sumber yang setara.

NKD merupakan *prospective*, diterapkan dalam rancangan perencanaan untuk situasi paparan terencana dalam kerangka optimisasi proteksi radiasi sesuai kebutuhan pentahapannya; yaitu desain atau modifikasi, penyiapan operasi, dll. Meskipun NKD dinyatakan dalam dosis individu, ia merupakan suatu besaran *source-related* yang ditujukan pada sumber, praktik atau tugas yang menerapkan proses optimisasi.

Setelah optimisasi di bawah NKD selesai, NKD secara operasional berakhir dan opsi proteksi yang optimal akan menghasilkan pilihan suatu tingkat dosis dan/atau suatu besaran turunan untuk digunakan sebagai target sebenarnya dalam operasi. Fitur disain dan kinerja operasional dinilai/dibandingkan dengan target ini yang karena itu mereka berkarakter *retrospective*; tingkat dosis yang dimaksud seperti itu termasuk *authorised levels* dan *operational levels*.

Lingkup Penerapan NKD

NKD diterapkan pada situasi paparan terencana. Untuk situasi paparan *emergency* dan situasi paparan *existing* (yang ada) kebutuhan suatu kendala semacam NKD diberi nama *reference level*. Pembedaan nama diperlukan karena selain situasi paparannya berbeda, dalam hal *reference level (RL)* ketika proses optimisasi berlangsung suatu pilihan yang melibatkan nilai dosis di atas RL dapat dilibatkan dalam rangka mengantisipasi kejadian luar biasa. Sedangkan dalam hal NKD pendekatan seperti itu ditolak dengan alasan karena cukup tersedia pengetahuan dan pengalaman dalam situasi paparan terencana.

NKD dapat diterapkan pada tiga kategori paparan yang dikenal sebagai paparan pekerja, paparan publik, dan paparan medik.

Dalam hal paparan medik, NKD tidak termasuk untuk paparan pasien yang diatur melalui konsep *diagnostic reference level* pada situasi paparan terencana. Untuk paparan medik penerapan NKD ditujukan untuk *comforters, carers, dan volunteers* (hanya untuk penelitian).

NKD untuk paparan publik dapat meliputi paparan dengan menggunakan peralatan yang biasa digunakan untuk paparan medik tetapi yang dilaksanakan tanpa indikasi klinis yaitu ditujukan untuk kebutuhan asuransi, lamaran kerja, legal, dll.; dalam hal ini nilai *diagnostic reference level* digantikan oleh NKD. Prosedur pencitraan di mana radiasi digunakan untuk memapari orang untuk mendeteksi senjata tersembunyi atau benda lain pada atau di dalam tubuh akan dianggap paparan publik. Secara khusus, pemegang ijin harus mengoptimalkan proteksi dan keselamatan dengan menerapkan NKD untuk mengatur paparan publik yang nilainya ditetapkan oleh Pemerintah atau BAPETEN.

Terkait dengan pendekatan bertingkat (*grade approach*) dalam pengawasan, pustaka [1] menyampaikan pandangan untuk menyikapi suatu sumber dengan risiko rendah sebagai berikut: “Mungkin ada kasus di mana tidak dibutuhkan lagi usaha tambahan dalam optimisasi setelah menetapkan suatu NKD. Khususnya untuk sumber sederhana pendekatan ini mungkin dibenarkan....”.

Persetujuan NKD

Persoalan NKD merupakan pendekatan menyelesaikan soal pelik mengenai “keadilan” penerimaan dosis individu yang harus disikapi secara arif. Oleh karena itu baik IAEA dan ICRP melalui publikasinya telah memberikan rekomendasi untuk para pihak yang seharusnya terlibat dalam penetapan dan persetujuan NKD. Berikut disajikan kutipan publikasi yang dapat memberikan gambaran mengenai nilai (spirit) yang disepakatinya.

ICRP Pub. 103 menyatakan sebagai berikut:

“*Executive summary: (a).....(q) The relevant national authorities will often play a major role in selecting values for dose constraints and reference levels. Guidance on the selection process is provided in the revised Recommendations. This guidance takes account of numerical recommendations made previously by the Commission.....*”.

Selain itu juga disampaikan sebagai berikut:

“.....(251...*In the Commission’s view, however, any such variations in the protection of the most highly exposed individuals are best*

introduced by the use of source-related dose constraints selected by regulatory authorities and applied in the process of optimization of protection.....”

BSS-115 menyatakan sebagai berikut:

“.... 2.26. *Except for medical exposure, the optimization of the protection and safety measures associated with any particular source within a practice shall be subject to dose constraints which: (a) do not exceed either the appropriate values established or agreed to by the Regulatory Authority for such a source or values which can cause the dose limits to be exceeded; and (b) ensure, for any source (including radioactive waste management facilities) that....*”.

Sedangkan GSR Part 3 menyatakan sebagai berikut:

“.....(1.23)...*For occupational exposure, the dose constraint is a tool to be established and used in the optimization of protection and safety by the person or organization responsible for a facility or activity. For public exposure in planned exposure situations, the government or the regulatory body ensures the establishment or approval of dose constraints, taking into account the characteristics of the site and of the facility or activity, the scenarios for exposure and the views of interested parties. After exposures have occurred,*”

Dari tiga kutipan penting tersebut dapat disimpulkan bahwa NKD merupakan manifestasi dari harapan untuk mewujudkan ‘keadilan’ dalam hal distribusi dosis individu dari pekerja dan anggota masyarakat dengan memposisikan regulator sangat penting yaitu sebagai pihak yang dapat memberikan persetujuan dalam rangka ‘menjaga’ kewajaran nilainya. Namun demikian selain berbasis ilmiah ia juga diharapkan peka terhadap “*value judgment*” yang berpengaruh sebagaimana dinyatakan berikut:

“.....*The establishment of constraints should be result of an interaction between operators and regulators. Although constraints can be established from a review of experience from well managed operations in comparable practices, or from a generic optimisation, the final choice of the protection option may also be affected by political, social, or other reasons suggesting the need not to exceed a given level of individual dose.....*”. [1]

PEMBAHASAN

NKD diartikan sebagai nilai batas

Kendala dosis adalah bukan batas dosis; melampaui suatu NKD bukan berarti tidak mematuhi persyaratan peraturan, tetapi hal ini

dapat menimbulkan tindak lanjut. NBD individu berhubungan dengan semua sumber yang menyumbangkan dosisnya. Sedangkan NKD, secara ketat diarahkan untuk hanya satu sumber dan kontribusi sumber itu terhadap dosis total yang diterima oleh individu dari semua sumber yang relevan. Dengan demikian, NKD tidak boleh ditafsirkan sebagai batas dosis.

NKD terutama ditujukan untuk mengevaluasi secara prospektif terhadap fasilitas yang akan dibangun dan/atau dimodifikasi sangat beda dibandingkan dengan status awalnya. Apabila masih memadai, NKD dari tahap tersebut dapat diajukan untuk perancangan optimisasi paparan terencana pada tahap merancang operasi selanjutnya. Dalam melakukan evaluasi prospektif tersebut, baik rencana operasi rutin maupun kejadian operasional yang mungkin muncul harus dipertimbangkan. Tugas yang tidak mungkin dilakukan tidak harus menjadi dasar untuk evaluasi prospektif. Jika selama operasi fasilitas, kinerja tugas pekerjaan yang berada di luar lingkup evaluasi prospektif diperlukan, maka program ALARA (optimisasi paparan pada tahap operasi) digunakan untuk mengoptimalkan proteksi terhadap berbagai tugas yang diperlukan. Namun, munculnya kebutuhan melakukan suatu tugas dan adanya penambahan dosis (yaitu lebih besar dari NKD) tidak berarti bahwa evaluasi prospektif itu cacat atau bahwa pembangun atau pemilik atau operator dari fasilitas gagal dalam tugasnya untuk secukupnya merencanakan perlindungan pekerja. Hanya jika dengan jelas menunjukkan bahwa mereka lalai dalam melakukan evaluasi prospektif, atau telah membangun atau mengoperasikan fasilitas yang bertentangan dengan hasil evaluasi prospektif untuk fasilitas tersebut, maka terbuka penyelidikan yang arahnya mempertanyakan kewajiban hukum.

Peran regulator sangat nyata untuk terwujudnya keberhasilan atau manfaat keberadaan NKD. Dalam menggambarkan tujuan NKD supaya dikembangkan oleh operator, maka regulator harus menjelaskan secara praktis bahwa operator perlu melakukan evaluasi (dan menguraikan keterbatasan evaluasi tersebut) terhadap pengalaman operasi dan praktek yang dipandang baik dalam menetapkan NKD. Regulator juga harus menyatakan apakah akan ada pendekatan investigasi oleh operator jika NKD yang ditentukan tersebut ternyata terlampaui ketika operasi fasilitas yang sebenarnya.

NKD dapat disalahartikan sebagai batas dosis atau batas untuk dosis operasional sebenarnya jika suatu pelanggaran peraturan

(sebenarnya atau ancaman) dinyatakan telah mengacu (mengutip) pada dilampauinya NKD yang diadakan untuk keperluan evaluasi prospektif.

Melebihi NKD seharusnya tidak menjadi pelanggaran peraturan tetapi memberikan cukup alasan untuk meminta Pemegang Ijin (PI) mengevaluasi hasil kerja yang dapat diterapkan untuk mengurangi secara nyata kemungkinan situasi di masa depan yang dapat mengarah dilampauinya NKD. Evaluasi tersebut dapat mencakup penyelidikan situasi yang terjadi dan penerapan tindakan perbaikan yang diperlukan untuk perencanaan kerja sama masa depan. Badan pengawas dapat meninjau tindakan perbaikan yang dilakukan.

PERKA tentang Proteksi dan Keselamatan Radiasi berpotensi salah pengertian tentang DC karena rancangannya terkesan mengarahkan ke pemahaman semacam nilai batas baru (kedua) selain NBD. Di sini DC diterjemahkan menjadi Pembatas Dosis karena mengikuti PP No.33. Bermula dari pemilihan kata untuk alih bahasa sampai definisinya sangat berpotensi disalahartikan menjadi suatu batas daripada sebagai suatu kendala. Selanjutnya persyaratan optimisasi yang dimuat terkesan sangat fokus pada Pembatas Dosis; ini karena konsekuensi dari menganut pada PP No.33. Seharusnya ia diposisikan secukupnya saja sebagaimana layaknya untuk alat bantu yang diperlukan dalam proses optimisasi bukan *predominan* sehingga telah mereduksi optimisasi itu sendiri menjadi DC.

Dengan menyaksikan narasi dari Pasal 38 berikut ini, akan terkesan mengarah pada bahwa keberadaan DC tidak stabil (apabila nilai operasi melampauinya harus diajukan perubahan nilai); diperlakukan retrospektif (bila dilampaui akan memicu kajian prosedur operasi), seharusnya kinerja operasi dibandingkan dengan kesimpulan dari optimisasi bukan dengan alat optimisasi; dan optimisasi tidak menyimpulkan atau menetapkan opsi dosis individu yang optimal untuk keperluan evaluasi retrospektif atau target operasi seperti *authorized level* dan/atau *operation level (investigation level)*; narasi selengkapnya adalah sebagai berikut:

“Pasal 45: (1) Dalam hal Dosis Pekerja Radiasi melebihi Pembatas Dosis tetapi tidak melebihi Nilai Batas Dosis, pemegang izin harus: a. mengkaji ulang pelaksanaan prosedur operasi; b. mengkaji ulang analisis pemilihan Pembatas Dosis sesuai dengan ketentuan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 44; (2) Dalam hal evaluasi sebagaimana dimaksud pada ayat (1) butir a dan butir b memerlukan perubahan Pembatas Dosis, Pemegang Izin harus mengajukan perubahan Pembatas Dosis kepada Ka. BAPETEN.

Persetujuan NKD merupakan beban dan berlebihan

Telah disampaikan di muka bahwa permasalahan NKD merupakan soal yang terkait dengan pandangan mengenai 'keadilan' yang dalam penyelesaiannya akan memerlukan pertimbangan ilmiah dan nilai-nilai setempat agar keputusan yang muncul mengandung kearifan dan dapat diterima oleh kelompok masyarakat yang sedang diperhatikan.

Sesungguhnya, optimisasi untuk proteksi radiasi suatu sumber mungkin juga dilakukan tanpa melibatkan NKD. Namun pendekatan ini berpeluang akan menghasilkan rencana dosis individu yang tidak adil sebagai akibat keleluasaan nilai-nilai setempat dalam mempengaruhi pengambilan keputusan. Oleh karena itu, baik ICRP maupun IAEA tetap berpandangan memelihara konsep NKD dalam publikasi mutakhirnya dengan memperkuat penjelasannya sehingga semacam "niat awal" upaya minimal yang wajar untuk merencanakan penanganan suatu sumber spesifik dalam melindungi penerimaan dosis individu agar "dinyatakan" oleh PI melalui penetapan NKD. Ambisinya yaitu menggapai lebih jauh lagi di bawah NKD sesuai kemampuan sumberdayanya tetapi wajar. Persoalannya yaitu, mengapa niat baik seperti ini dengan disajikan secara unik untuk suatu sumber tertentu dan sesuai kemampuan PI dipandang menjadi beban dan berlebihan ketika diterapkan secara formal dengan membutuhkan persetujuan badan pengawas [9,10]. Bahwa PI telah dibebani dengan persyaratan keselamatan yang ada dan sekarang di tambahkan lagi suatu gagasan persetujuan NKD.

Penulis memandang soal ini dengan menyandingkan situasi di bidang lain yang dapat dipelajari tetapi berlawanan atributnya namun sama-sama membutuhkan "value judgment" yaitu mengenai penetapan Upah Minimum Regional (UMR). Yang dimaksud berbeda atribut di sini yaitu bahwa upah merupakan manfaat sedangkan dosis radiasi merupakan beban. Pelajaran yang hendak diambil yaitu bagaimana posisi suatu badan pengawas untuk mengupayakan agar masyarakat terlindungi dari praktik tidak adil dalam hal distribusi beban dan manfaat. Secara singkat penulis ingin mengutarakan bahwa pernyataan tentang "persetujuan NKD oleh BAPETEN merupakan beban dan berlebihan" tidak sesuai untuk dibahas secara ilmiah melainkan lebih baik masuk ke ranah pembahasan nilai—nilai budaya kita. Sedangkan konsep NKD itu sendiri sudah merupakan buah dari upaya pendekatan ilmiah mengenai tingkat normal dosis individu untuk suatu sumber atau kegiatan berdasarkan pengetahuan dan pengalaman yang

tersedia.

Baik ICRP maupun IAEA memposisikan badan pengawas sangat penting untuk mensukseskan peran NKD. Dengan demikian, persoalan selanjutnya adalah terletak pada kesanggupan nilai-nilai budaya Indonesia untuk menyerap konsep NKD yang tidak dapat lepas dari "keyakinan kita" atau cara pandang mengenai keadilan. Untuk menjadi pegangan dalam pembahasan di disini, NBD bercirikan sebagai standar, sedangkan NKD berada pada posisi spesifik sesuai dengan kemampuan PI yang "berkesadaran". Bagaimanapun, persetujuan NKD oleh badan pengawas dipandang dari kepentingan "majikan" akan mengundang reaksi sebagai beban dan berlebihan semacam kekhawatiran terhadap persetujuan meningkatkan upah UMR, sedangkan dalam persoalan proteksi radiasi terhadap persetujuan penetapan NKD yang wajar. Padahal NKD diadakan untuk membantu perencanaan dalam mengoptimalkan proteksi dosis individu tetapi justru ditanggapi sebagai beban. Badan pengawas diharapkan dapat bersikap arif dalam menyikapi tuntutan majikan, pekerja, dan masyarakat luas di mana kewenangan dan kepercayaan menjadi taruhannya. Contoh konkrit persoalan ini yaitu bagaimana sikap BAPETEN menghadapi PI yang mengusulkan penetapan NKD mendekati sama dengan NBD, walaupun katakanlah prestasi 95% untuk distribusi dosis individunya pada keadaan normal jauh di bawah NBD. Apakah ini termasuk dalam hal salah pengertian tentang NKD atau persoalan nilai-nilai setempat.

Mungkin bermanfaat bila pembahasan tentang NKD kaitannya dengan "nilai setempat" ini di bawa ke tataran falsafah keselamatan radiasi (nuklir) di mana dalam arena ini IAEA telah membekali kita dengan *Fundamental Safety Principles* [11], dikenal sebagai SF-1, untuk berkomunikasi dengan "komunitas non-nuklir" secara produktif; melalui SF-1 ini falsafah proteksi radiasi, keselamatan nuklir dan keselamatan pengelolaan limbah telah bersatu. Dengan demikian diharapkan nilai-nilai setempat dapat berinteraksi secara "nyaman" dengan nilai-nilai keselamatan SF-1 untuk mendapatkan solusi yang arif tidak hanya untuk masalah NKD tetapi mencakup lainnya seperti introduksi PLTN di Indonesia.

KESIMPULAN

Telah dibahas konsep *dose constraints* (DC) dan masalah penerapannya dengan mengacu pada publikasi ICRP dan IAEA, publikasi mutakhir institusi berkompeten, dan pengamatan penulis terhadap praktek proteksi radiasi di Indonesia. DC sangat potensial disalahartikan sebagai nilai batas semacam NBD kedua mengikuti evaluasi retrospektif daripada

yang seharusnya yaitu sebagai evaluasi prospektif. Diusulkan alih bahasa dari DC yaitu Nilai Kendala Dosis (NKD) untuk menghindari penggunaan kata “batas” dan bermakna sebagai alat bantu dalam optimisasi yang bercirikan prospektif dan mengandalkan kesadaran “majikan-pekerja”.

Persetujuan NKD dipandang sebagai beban dan berlebihan merupakan tantangan BAPETEN dalam menyikapi nilai-nilai setempat secara arif di mana kewenangan dan kepercayaan dipertaruhkan. Untuk memenuhi kebutuhan ini IAEA telah menerbitkan SF-1 yang menyatukan filosofi proteksi radiasi, keselamatan nuklir dan pengelolaan limbah. BAPETEN agar mengupayakan cara yang efektif untuk memasyarakatkan DC termasuk meningkatkan dan memelihara penguasaan SF-1 yang dibutuhkan untuk berinteraksi dengan nilai-nilai setempat sehingga pengawasan ketenaganukliran akan lebih produktif untuk kepentingan masyarakat luas tidak hanya dalam masalah NKD tetapi banyak hal lain termasuk introduksi PLTN di Indonesia.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis ingin menyampaikan terimakasih bagi staf P2STPFRZR dan berbagai pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu atas partisipasi dan dukungannya dalam menyelenggarakan kajian di bidang proteksi dan keselamatan radiasi sehingga kajian telah berlangsung tanpa kendala yang berarti.

DAFTAR PUSTAKA

1. Nuclear Energy Agency (NEA), *Considerations on the Concept of Dose constraints*, OECD NEA, Paris, (1996).
2. Nuclear Energy Agency (NEA), *Committee on Radiation Protection and Public Health*, NEA/CRPPH/R (2011)
3. ICRP, *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, ICRP Publ. 103, (2007).
4. International Atomic Energy Agency (IAEA), *Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards*, Interim Edition, GSR-Part 3, IAEA, Vienna, (2011).
5. Peraturan Pemerintah No. 33 Tahun 2007 Tentang Keselamatan Radiasi Pengion dan Keamanan Sumber Radioaktif ICRP (2007).
6. BAPETEN, PERKA No.4 Tahun 2013 Tentang Proteksi dan Keselamatan Radiasi dalam Pemanfaatan Tenaga Nuklir.
7. Kristin S. Frechete, and Lars Persson, *Ethical Problem in Radiation Protection*, Swedish Radiation Protection Institute, (2001).
8. IAEA, *Optimization of Radiation Protection in the Control of Occupational Exposure*, Safety Report Series No. 21, Vienna, 2002.
9. Eri Hiswara, Komunikasi pribadi.
10. Togap Marpaung, “Kajian Mengenai Penerapan Konsep Pembatas Dosis Merupakan Amanat Pasal 35 dan 36 PP. No. 33 tahun 2007, Seminar Nasional Pengelolaan Limbah Radioaktif, Puspiptek-DRN, 2012.
11. IAEA, *Fundamental Safety Principles*, Safety Fundamentals No. SF-1, IAEA, Vienna, (2006).

PENGARUH LEPASAN TENORM PADA LAJU DOSIS RADIASI DI SEKITAR PLTU LABUAN, BANTEN

Niken Hayudanti Anggarini, Megi Stefanus

Magister Program Studi Ilmu Lingkungan, Sekolah Ilmu Lingkungan, Universitas Indonesia
Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi (PAIR), BATAN, Jl. Lebak Bulus Raya No. 49
Email: niken150584@gmail.com

ABSTRAK

PENGARUH LEPASAN TENORM PADA LAJU DOSIS RADIASI DI SEKITAR PLTU LABUAN, BANTEN. Abu terbang adalah salah satu emisi dari PLTU berbahan bakar batu bara yang termasuk sebagai TENORM. Lepasannya sebagai TENORM dari industri pembangkit listrik berbahan bakar batu bara berpotensi terakumulasi di lingkungan dan meningkatkan laju dosis radiasi lingkungan. Laju dosis radiasi lingkungan di sekitar PLTU Labuan belum terukur padahal dengan mengetahui hal ini dapat menilai dampak negatif lepasan abu terbang pada risiko paparan radiasi eksternal di masyarakat. Tujuan dari penelitian ini adalah mengukur laju dosis radiasi lingkungan di sekitar PLTU Labuan dan menganalisis pengaruh radius pada laju dosis radiasi lingkungan. Metode penelitian adalah melakukan pengukuran laju dosis radiasi menggunakan alat surveymeter gamma dengan detektor NaI(Tl) jenis eksploranium GR-135 plus. Pengukuran dilakukan sepanjang lokasi grid yang telah ditentukan sebelumnya. Grid mewakili radius dari PLTU, semakin jauh dari PLTU semakin luas grid pengukurannya, grid yang ditentukan adalah sebesar 1x1 km, 3x3 km, 5x5 km, 10x10 km, 15x15 km. Lebih lanjut, pengaruh radius pada laju dosis radiasi diuji menggunakan uji anova. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa rata-rata laju dosis radiasi di sekitar PLTU Labuan sebesar $47,71 \pm 4,17$ nSv/jam, masih lebih rendah jika dibandingkan rata-rata laju dosis radiasi gamma dari sumber terestrial yang diterima masyarakat dunia berdasarkan data dari UNSCEAR sebesar 0,48 mSv/tahun (54,79 nSv/jam). Nilai ini juga masih di bawah rata-rata radiasi gamma di Pulau Jawa yang sebesar 0,46 mSv/tahun (52,51 nSv/jam). Penelitian ini juga menunjukkan bahwa radius memiliki pengaruh yang nyata pada laju dosis radiasi lingkungan. Kesimpulan penelitian ini adalah laju dosis radiasi di sekitar PLTU Labuan masih aman dan terdapat pengaruh radius pada rata-rata laju dosis radiasi.

Kata kunci: TENORM, abu terbang, laju dosis radiasi, paparan radiasi eksternal.

ABSTRACT

EFFECT OF TENORM RELEASE ON RADIATION DOSE RATE AT COAL-FIRED POWER PLANT LABUAN, BANTEN. Flying ash is one of the emissions from coal-fired power plant which is included as TENORM. The fly ash discharge as TENORM from the coal-fired power plant industry has the potential to accumulate in the environment and increase the dose rate of environmental radiation. Environmental radiation dose rate around Labuan Power Plant has not been measurable, whereas it can assess the negative impact of fly ash release on the risk of exposure to external radiation in the community. The purpose of this study is to measure the rate of environmental radiation doses around Labuan Power Plant and to analyze the effect of radius on the dose rate of environmental radiation. The research method is to measure radiation dose rate using gamma surveymeter with detector NaI (TI) type eksploranium GR-135 plus. Measurements are made along the predetermined grid locations. The grid represents the radius of the power plant, the specified grid are 1x1 km, 3x3 km, 5x5 km, 10x10 km, 15x15 km. Furthermore, effect of radius on the rate of radiation dose was tested using anova. The measurement results show that the average rate of radiation dose around PLTU Labuan is 47.71 ± 4.17 nSv/hour, still lower than the average rate of gamma radiation dose from terrestrial sources received by the world community based on data from UNSCEAR of 0.48 mSv/year (54.79 nSv/hr). This average is also below the average of gamma radiation in Java which is 0.46 mSv/year (52.51 nSv/hr). The study also showed that the radius had a noticeable effect on the dose rate of environmental radiation. The conclusion of this research is the rate of radiation dose around Labuan power plant is still safe and radius effect on average of environmental radiation dose rate around Labuan Power Plant.

Keywords: TENORM, fly ash, environmental radiation dose rate, external radiation exposure.

PENDAHULUAN

Salah satu industri penghasil TENORM adalah Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) berbahan bakar batu bara. Pembangkit listrik menggunakan batu bara sebagai energi panas dengan pembakaran pada suhu tertentu sehingga menghasilkan limbah pembakaran seperti *fly ash* (abu terbang) dan *bottom ash* (abu dasar). Batu bara dengan konsentrasi radionuklida relatif lebih tinggi dibandingkan tanah (9) tentunya menghasilkan limbah pembakaran mengandung TENORM dengan konsentrasi tertentu. Konsentrasi TENORM pada abu terbang dan abu dasar dapat lebih tinggi 5-10 kali lipat jika dibandingkan dengan batu bara (11). Beberapa radionuklida TENORM yang dihasilkan PLTU berbahan bakar batu bara adalah U-238, U-234, Th-230, Ra-226, Pb-210, Po-210, Th-232, Ra-228, dan Th-228 sebagai radionuklida TENORM (4). Radionuklida ini merupakan radionuklida alamiah dan turunannya. Radionuklida dominan pada abu terbang dan abu dasar adalah Ra-226, Th-232, dan K-40 (2). Adapun konsentrasi radionuklida dalam abu terbang di Indonesia adalah Ra-226 dan Th-232 masing-masing sekitar 76 Bq/kg dan K-40 sekitar 400 Bq/kg (6).

Penggunaan sistem filtrasi pada pembangkit listrik jika berfungsi dengan baik hanya dapat mengurangi emisi abu terbang ke udara sekitar 95%. Sekitar 2-5% abu terbang yang dihasilkan terlepas ke udara (5). Lepasannya abu terbang ini pada jarak tertentu akan jatuh ke permukaan bumi dan berisiko mengkontaminasi air, tanaman, dan tanah (11). Pada jarak tertentu inilah peningkatan laju dosis radiasi lingkungan mungkin terjadi. Masyarakat yang tinggal kira-kira radius 0,8-1,6 km dari bangunan cerobong PLTU dapat teringesti sejumlah kecil radionuklida (13). Kenaikan konsentrasi radionuklida juga berkontribusi terhadap kenaikan laju paparan radiasi di masyarakat, sehingga daerah yang terkontaminasi TENORM akan memiliki laju paparan radiasi lebih tinggi di banding daerah lain. Lebih lanjut, penelitian di Portugal menyebutkan bahwa tingkat radiasi tertinggi adalah pada radius 6-20 km dari bangunan cerobong industri penghasil TENORM (5).

Pembangkit listrik dengan bahan bakar batu bara cukup diandalkan di Indonesia. Biaya pembangkitan yang relatif lebih murah dan jumlah batu bara yang siap dieksploitasi secara besar menjadi keunggulannya. Bahkan kebijakan menyangkut batu bara sebagai andalan energi di Indonesia tertulis dalam Peraturan Pemerintah RI no.79 tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional. Kebijakan ini menyebutkan bahwa

Pemerintah akan terus menggunakan batu bara sebagai andalan pasokan energi nasional sampai tahun 2050. Hal ini menjadi alasan adanya peningkatan kapasitas PLTU batu bara lebih dari sepuluh kali lipat selama tujuh periode dari tahun 1994 (3). Peranan PLTU batu bara juga diprediksi berperan dalam memenuhi kebutuhan listrik pada tahun 2020 mencapai 24% dari total kapasitas pembangkit nasional (8).

Penggunaan batu bara sebagai bahan bakar PLTU dengan periode waktu yang lama memungkinkan adanya akumulasi lepasan radionuklida di lingkungan. Hal ini berisiko pada peningkatan laju dosis radiasi di lingkungan. Paparan radiasi alam yang meningkat seiring dengan akumulasi TENORM akan berdampak pada kesehatan masyarakat di sekitarnya. Manusia memiliki kemampuan untuk mentoleransi paparan radiasi dari alam, tapi aktivitas beberapa industri yang menggunakan sumber radiasi alam dapat meningkatkan paparan radiasi alam (1). Hal ini mungkin dapat menimbulkan risiko kesehatan dan lingkungan jika tidak dikontrol.

Laju dosis radiasi lingkungan di sekitar PLTU berbahan bakar batu bara tentunya harus mempertimbangkan batasan nominal dosis rendah. Batasan laju dosis radiasi yang digunakan sebagai pembanding adalah berdasarkan *United Nation Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation (UNSCEAR)* menyatakan bahwa rata-rata paparan radiasi persion dari sumber terestrial yang diterima masyarakat dunia adalah sebesar 0,48 mSv/tahun (54,79 nSv/jam) (12). Lebih lanjut, Kontribusi terbesar dari paparan radiasi ini adalah radon sebesar 50% dari total dosis rata-rata yang diterima masyarakat (7). Adapun tingkat radiasi gamma rata-rata di Pulau Jawa sebesar 0,46 mSv/tahun (10). Penelitian berkaitan tentang laju dosis radiasi di sekitar PLTU pernah dilakukan di negara Portugis yang menyatakan bahwa rata-rata laju dosis radiasi di sekitar PLTU mencapai 4 kali lebih tinggi dibandingkan rata-rata laju dosis yang diterima masyarakat dunia (5)

Berdasarkan apa yang sudah disampaikan sebelumnya, tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui laju dosis radiasi lingkungan di sekitar PLTU Labuan dan menganalisis pengaruh radius pada laju dosis radiasi. Penelitian ini diharapkan memberikan informasi mengenai tingkat paparan radiasi lingkungan di sekitar PLTU Labuan dan mengetahui adanya pengaruh radius pada laju dosis radiasi untuk menentukan radius dengan tingkat paparan radiasi paling tinggi. Berdasarkan dari tujuan ini dapat ditentukan

hipotesis penelitian bahwa terdapat pengaruh radius dari PLTU pada laju dosis radiasi di masyarakat.

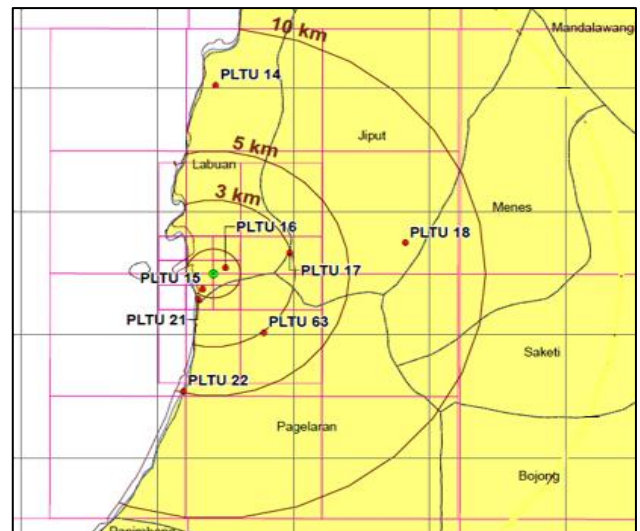
METODOLOGI

Sampling

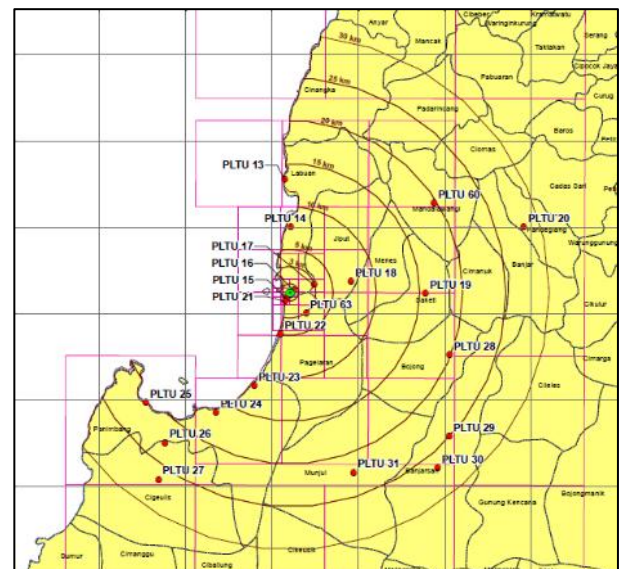
Pengukuran laju dosis radiasi dilakukan sepanjang perjalanan di dalam *grid* yang ditentukan. Pada pengukuran laju dosis radiasi dilakukan pengukuran *shielding factor* (faktor penahan radiasi). Faktor penahan radiasi didapatkan dari hasil pembagian antara pengukuran laju dosis radiasi yang diukur di dalam mobil pada saat mobil berhenti dengan laju dosis radiasi yang diukur di luar mobil. Faktor penahan radiasi inilah yang digunakan sebagai pembagi laju dosis yang terukur sepanjang perjalanan, sehingga didapatkan laju dosis sesungguhnya di lingkungan.

Lokasi *grid* yang diukur sudah ditentukan sebelumnya menggunakan *mapinfo*. Grid yang ditentukan mewakili radius dari PLTU. Besarannya adalah 1x1 km, 3x3 km, 5x5 km, 10x10 km, 15x15 km. Besaran grid ini mempertimbangkan kemungkinan luasan kontaminasi yang terjadi karena lepasan abu terbang. Semakin jauh jarak dari PLTU, maka semakin kecil kemungkinan kontaminasi, sehingga ditentukan luasan *grid* yang semakin besar. Data laju dosis yang terukur di setiap *grid* ditentukan sebanyak 100 data. Penyeragaman jumlah data dalam setiap *grid* dilakukan untuk memudahkan dalam melakukan uji statistik. Gambar lokasi pengukuran laju dosis radiasi dapat dilihat pada Gambar 1.

Alat yang digunakan adalah surveimeter gamma dengan jenis eksploranium GR-135 *plus*. Cara kerja alat ini adalah dengan mengaktifkan alat selama perjalanan di dalam *grid* dan menonaktifkan saat sudah keluar dari *grid*. Angka yang tertera pada alat adalah laju dosis yang terukur setiap detik. Data ini terekam seluruhnya di alat dan dapat dipindahkan sewaktu-waktu ke dalam komputer. Pengukuran laju dosis radiasi menggunakan eksploranium GR-135 *plus* ditunjukkan pada Gambar 2.



a

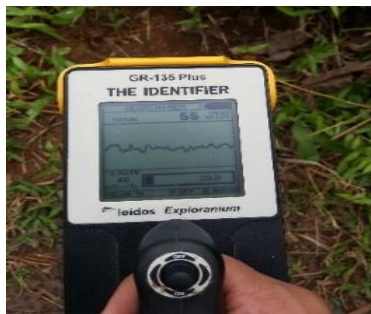


b

Gambar 1. Grid lokasi pengukuran laju dosis radiasi: a. sampai radius 1 - 10 km dari PLTU, b. sampai radius 30 km dari PLTU.

Pengolahan data

Data hasil pengukuran memiliki satuan nSv/jam. Data ini selanjutnya dikalikan dengan faktor penahan radiasi, yaitu 0,825 dan faktor kalibrasi alat yaitu 1,25. Hasil perkalian didapatkan laju dosis radiasi lingkungan. Lebih lanjut, analisis yang digunakan untuk melihat pengaruh radius pada laju dosis radiasi lingkungan adalah uji anova.



Gambar 2 Pengukuran menggunakan Eksploraniu

Tabel 1. Laju Dosis Radiasi berdasarkan Lokasi dan Radius

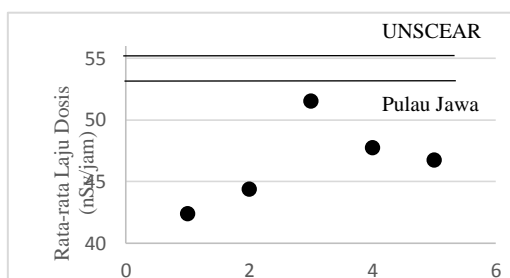
No.	Radius	Kode sampel	Lokasi	Rata-rata Laju Dosis tiap lokasi (nSv/jam)	Rerata Laju Dosis tiap radius (nSv/jam)
1	0-1 km	PLTU 15	Desa Margagiri, Kec. Labuan	42,88 ± 14,27	42,40 ± 14,4 2
		PLTU 16	Desa Margasana, Kec. Pagelaran	41,49 ± 14,96	
		PLTU 21	Desa Palurahan, Kec. Kaduhejo	42,81 ± 13,88	
2	1-4 km	PLTU 17	Desa Margasana, Kec. Pagelaran	44,20 ± 13,37	44,39 ± 14,7 4
		PLTU 22	Kp. Tegalpapak, Kec. Labuan	40,68 ± 14,16	
		Antara PLTU 14&16	Raya Carita, Kec. Carita	48,31 ± 15,53	
3	4-9 km	PLTU 14	Desa Banjarmasin, Kec. Carita	51,88 ± 17,00	51,53 ± 16,6 4
		PLTU 63	Desa Pagelaran, Kec. Pagelaran	49,30 ± 15,40	
		PLTU 18	Desa Cipucung, Kec. Cikedal	54,12 ± 17,04	
4	9-19 km	PLTU 13	Desa Sukarame, Kec. Carita	48,25 ± 13,91	47,75 ± 16,6 6
		PLTU 19	Desa Sodong, Kec. Saketi	53,90 ± 18,40	
		PLTU 23	Kel. Panimbangan, Kec. Panimbangan	41,76 ± 14,08	
		PLTU 28	Kec. Saketi	47,97 ± 14,89	
		PLTU 29	Desa Cidahu, Kec. Banjarsari	52,98 ± 16,88	
PLTU 60	Desa Pari, Kec. Mandalawangi	47,41 ± 15,67			
5	19-30 km	PLTU 20	Desa Palurahan, Kec. Kaduhejo	52,09 ± 17,15	46,75 ± 18,76
		Antara PLTU 60&20	Desa Cikuang, Kec. Pabuaran	58,96 ± 21,39	
		Antara PLTU 19&20	Raya Labuan, Kec. Labuan	42,83 ± 14,90	

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengukuran laju dosis radiasi lingkungan sekitar PLTU Labuan telah dilakukan. Pengukuran ini untuk melihat apakah lepasan abu terbang yang mengandung radionuklida berpengaruh pada laju dosis radiasi lingkungan. Abu terbang yang mengandung radionuklida dapat terlepas ke udara melalui cerobong PLTU. Abu terbang ini akan terbawa angin dan mencapai jarak tertentu kemudian jatuh ke permukaan tanah. Semakin banyak abu terbang yang terjatuh pada jarak tertentu, mungkin semakin tinggi peningkatan radionuklida di tanah pada lokasi tersebut. Hal ini mungkin akan membuat laju dosis radiasi pada lokasi tersebut lebih tinggi dibandingkan lokasi lainnya. Data laju dosis ditampilkan pada Tabel 1.

Pengukuran laju dosis radiasi dilakukan pada saat kondisi cuaca tidak hujan. Perlakuan ini dilakukan pada semua pengukuran laju dosis radiasi. Hal ini bertujuan untuk menghindari kemungkinan paparan radiasi dari abu terbang yang kemungkinan terjatuh terbawa hujan, sehingga diharapkan bahwa laju dosis radiasi yang terukur adalah laju dosis radiasi yang berasal dari tanah.

Tabel 1 menunjukkan rata-rata laju dosis radiasi setiap lokasi. Laju dosis tertinggi di Desa Cikuang, Kecamatan Pabuaran sebesar $58,96 \pm 21,39$ nSv/jam. Pengukuran laju dosis pada *grid* ini bukan lokasi pengambilan sampel tanah, sehingga tidak dapat dipastikan bahwa tingginya laju dosis yang terukur pada wilayah ini karena tingginya radionuklida dalam tanah. Laju dosis kedua tertinggi yaitu di daerah Desa Cipucung, Kecamatan Cikedal dengan laju dosis sebesar $54,12 \pm 17,04$ Bq/kg. Rata-rata laju dosis radiasi di sekitar PLTU Labuan sampai pada radius 30 km adalah $47,71 \pm 4,17$ nSv/jam. Nilai rata-rata ini lebih rendah jika dibandingkan data dari UNSCEAR. Rata-rata ini juga masih di bawah rata-rata radiasi gamma di Pulau Jawa yang sebesar 0,46 mSv/tahun ($52,51$ nSv/jam). Hasil ini juga tidak dapat disandingkan dengan penelitian di negara Portugis yang menyatakan bahwa laju dosis radiasi di sekitar PLTU dapat 4 kali lebih tinggi dibandingkan rata-rata laju dosis yang diterima masyarakat dunia (5). Berdasarkan hasil ini, laju dosis radiasi di daerah sekitar PLTU Labuan masih aman dan kontribusi laju dosis dari lepasan abu terbang yang mengandung radionuklida tidak signifikan. Perbedaan hasil penelitian ini mungkin disebabkan karena di sekitar PLTU Labuan belum terkontaminasi oleh abu terbang yang mengandung radionuklida dari PLTU. Grafik rata-rata laju dosis pada setiap radius ditunjukkan pada Gambar 3.



Keterangan:

- 1: radius 0-1 km
- 2: radius 1-4 km
- 3: radius 4-9 km
- 4: radius 9-19 km
- 5: radius 19-30 km

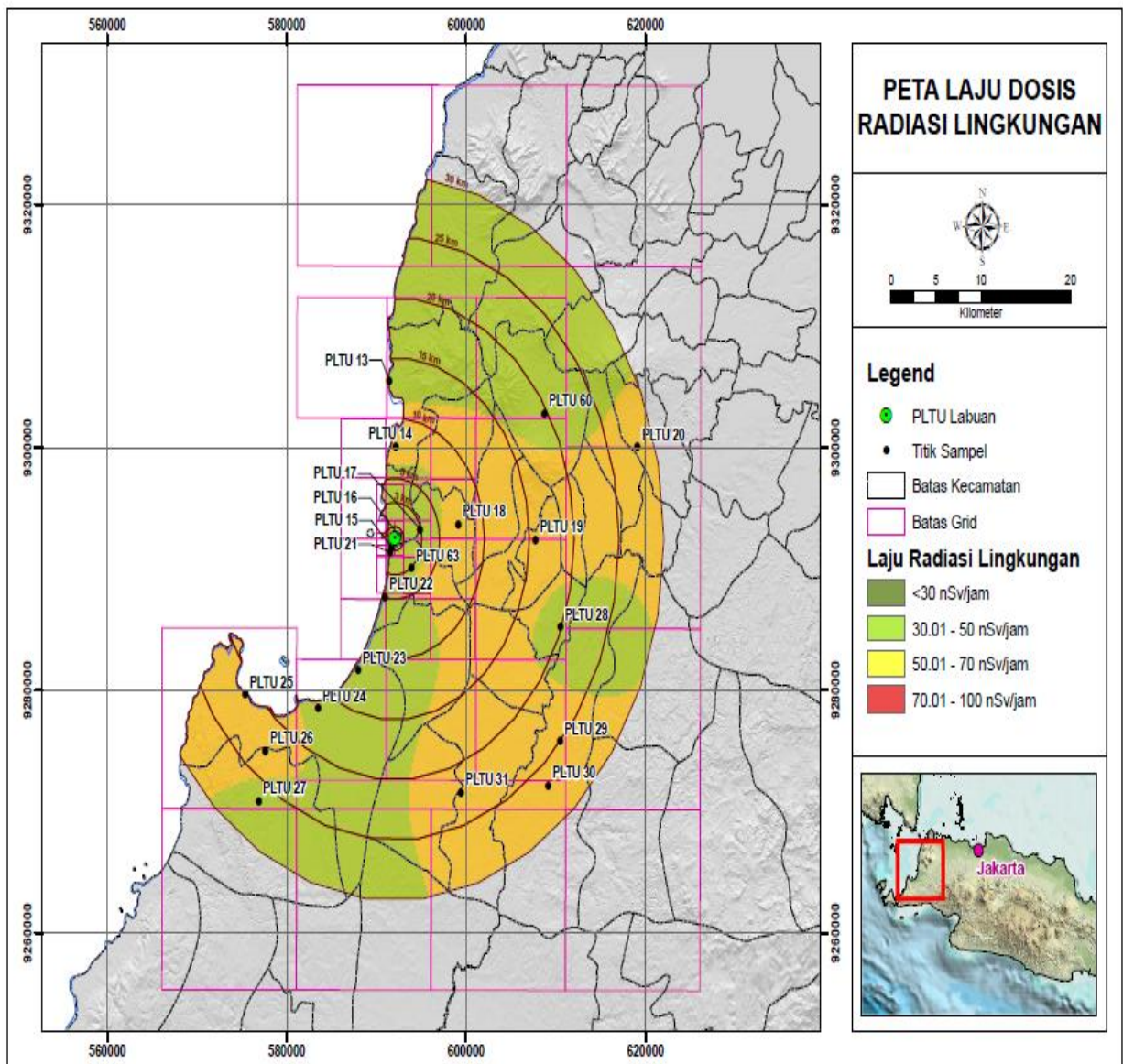
Gambar 3 Grafik rata-rata laju dosis radiasi berdasarkan radius.

Gambar 3 menunjukkan bahwa rata-rata laju dosis radiasi tertinggi terdapat pada radius 4-9 km. Pada radius ini, laju dosis rata-ratanya adalah $51,53 \pm 16,64$ nSv/jam. Desa yang terdapat pada radius ini adalah Desa Banjarmasin, Desa Pagelaran, dan Desa Cipucung. Hasil ini dapat dikatakan sesuai dengan pernyataan bahwa tingkat radiasi tertinggi adalah pada jarak 6 km dan pada beberapa stasiun pengukuran pada jarak 6-20 km dari cerobong industri penghasil TENORM di negara Portugal (5). Terdapat perbedaan ukuran radius antara penelitian ini dan penelitian di Portugal, tetapi dapat dikatakan bahwa jarak 6 km masih terdapat di antara radius 4-9 km. Perlu dilakukan penelitian kembali untuk memastikan pada jarak berapa di radius 4-9 km tersebut yang memiliki laju dosis tertinggi. Peta laju dosis radiasi di sekitar PLTU Labuan sampai radius 30 km dapat dilihat pada Gambar 4.

Rata-rata laju dosis radiasi pada setiap radius diuji menggunakan statistik. Hal ini bertujuan untuk melihat apakah ada perbedaan nilai rata-rata laju dosis radiasi pada radius yang berbeda. Berdasarkan hasil pengujian didapatkan nilai *sig.* adalah 0. Taraf signifikan yang digunakan adalah 0,05. Keputusan yang diambil adalah H_0 ditolak karena nilai *sig.*(0) < α (0,05). Hasil pengujian menunjukkan bahwa terdapat perbedaan yang nyata pada rata-rata laju dosis radiasi di setiap radius yang berbeda. Perbedaan nilai rata-rata laju dosis pada setiap radius memiliki pengertian bahwa setiap radius dari PLTU Labuan memiliki varian laju dosis radiasi yang berbeda. Perbedaan laju dosis pada setiap radius dapat menjadi penanda beberapa kecamatan yang berada pada radius tertentu. Seperti yang sudah disebutkan sebelumnya bahwa pada radius 4-9 km memiliki laju dosis radiasi tertinggi. Hal ini dapat dijadikan sebagai penanda lokasi bahwa pada radius tersebut memiliki risiko lebih tinggi mengalami peningkatan laju dosis radiasi apabila abu terbang terakumulasi pada wilayah tersebut.

KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diambil adalah laju dosis radiasi di sekitar PLTU Labuan sampai radius 30 km masih dibawah rata-rata laju dosis radiasi gamma di Pulau Jawa dan rata-rata laju dosis radiasi gamma yang diterima penduduk dunia dari radiasi terrestrial. Hal ini dapat dikatakan bahwa laju dosis radiasi di sekitar PLTU Labuan masih aman. Lebih lanjut, radius memiliki pengaruh yang nyata pada perbedaan rata-rata laju dosis radiasi lingkungan di sekitar PLTU Labuan.



Gambar 4 Peta laju dosis radiasi di sekitar PLTU Labuan sampai radius 30 km pada November 2016.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih disampaikan kepada Program Studi Ilmu Lingkungan Universitas Indonesia, Bidang Radioekologi PTKMR-BATAN, teman-teman di Bidang Keselamatan Kerja dan Lingkungan PAIR-BATAN yang telah membantu baik dalam bentuk fasilitas, dana ataupun peralatan bagi keberhasilan dan kelancaran kegiatan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

1. Alatas, Z.. Efek kesehatan pajanan radiasi dosis rendah. Prosiding Seminar Aspek Keselamatan Radiasi dan Lingkungan pada Industri NonNuklir, (Maret, 2003).
2. Amin, YM, M.U. Khandaker, A.K.S. Shyen, R.H. Mahat, R.M. Noor, D.A. Bradley.. Radionuclide emission from coal-fired power plant. *J. Applied Radiation and Isotopes*; (80): 109-116, (2013).
3. Boedoyo, M.S., Sugiyono, A.. "*Optimasi suplai energi dalam memenuhi kebutuhan tenaga listrik jangka panjang di Indonesia*". J. dosen,(2000).
4. Bunawas, Syarbaini. Penentuan potensi risiko TENORM pada industri nonnuklir. *Buletin Alara*; 6(3): 143–150, (2005).
5. Dinis, M.D.L., António F., J.S. de Carvalho, J. Góis, A.C.M. Castro.. *Radiological impact associated to technologically enhanced naturally occurring radioactive materials (TENORM) from coal-fired power plants emissions*. Proceeding of WM2013 Conference, Phoenix, Arizona USA, (2013).
6. Israeli coal ash board. *General information radionuclides in Israeli National Coal Ash Board* 2012.
7. Minarni, A. Dadong I., Bunawas. (1996, Agustus). Radon di Kompleks Perumahan BATAN. Makalah dipresentasikan di Presentasi Ilmiah Keselamatan Radiasi dan Lingkungan, PSPKR BATAN.
8. Nurdyastuti, I.. Analisis pemanfaatan energi pada pembangkit tenaga listrik di Indonesia. Pengembangan sistem kelistrikan dalam menunjang pembangunan nasional jangka panjang, (2007).
9. Sastrosudarmo, S. Dasar-dasar proteksi radiasi dan pemantauan radiasi lingkungan. BATAN, (2000).
10. Suharyono, Gatot, Buchori, Dadong I.. Laju dosis radiasi gamma lingkungan di Pulau Jawa. Prosiding dalam seminar PPI - PDIPTN 2007, Pusat Akselerator dan Bahan, BATAN, (2007).
11. Sutarman, Marzaini N., Asep W., Emlinarni, R. Buchari.. Penentuan tingkat radiasi dan radioaktivitas lingkungan di

kawasan pusat listrik tenaga uap batu bara di daerah Paiton. Prosiding dalam Seminar Nasional ke-9 Teknologi dan Keselamatan PLTN serta Fasilitas Nuklir, (2003).

12. UNSCEAR.. *Sources and effect of ionizing radiation*. New York: United Nation, (2000).
13. Zakaria, N., R. Ba'an, S. Kathiravale.. *Radiological impact from airborne routine discharges of coal-fired power plant*. Proceeding of RnD Dewan Tun Dr. Ismail Agensi Nuklear Malaysia, (2010).

STUDI INTERRELASI AIR TANAH DAN AIR LINDI DI SEKITAR TPST PIYUNGAN YOGYAKARTA

Erwin A. P. Gonti¹, Agus Budhie Wijatna², Satrio³

^{1,2} Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika FT – UGM

Jln. Grafika No.2, Yogyakarta, 55281, Indonesia

³ Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi (PAIR) – BATAN

Jln. Lebak Bulus Raya No.49, Jakarta Selatan, 12440, Indonesia

Email: winandriawan@gmail.com

ABSTRAK

STUDI INTERRELASI AIR TANAH DAN AIR LINDI DI SEKITAR TPST PIYUNGAN YOGYAKARTA. Telah dilakukan penelitian air tanah di sekitar TPST Piyungan, Daerah Istimewa Yogyakarta menggunakan metode pendekatan isotop stabil dan hidrokimia. Isotop stabil yang digunakan yaitu ^2H dan ^{18}O yang terkandung dalam air. Penelitian dilakukan dengan mengambil satu sampel air lindi sebagai kontaminan dan sejumlah sampel air tanah yang ada di sekitar TPST Piyungan. Sampel-sampel tersebut kemudian dianalisis konsentrasi isotop alam dan kimia airnya. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui keterkaitan atau interrelasi antara air lindi sebagai kontaminan dengan air tanah di sekitar TPST Piyungan. Berdasarkan hasil analisis isotop stabil ^2H dan ^{18}O , air lindi mempunyai konsentrasi isotop stabil ^2H dan ^{18}O yang lebih kaya (*enrich*) akibat pertukaran dengan H_2S , jika dibandingkan dengan konsentrasi isotop stabil ^2H dan ^{18}O air tanah yang jauh lebih miskin (*depleted*). Hal ini mengindikasikan bahwa tidak terdapat interrelasi antara air tanah dan air lindi di sekitar TPST Piyungan. Hal ini juga didukung dengan hasil analisis hidrokimia yang menunjukkan bahwa secara umum air tanah mempunyai tipe air CaHCO_3 sebagai air tanah tawar atau *freshwater*, sedangkan air lindi mempunyai tipe NaKHCO_3 sebagai air yang telah mengalami pencampuran akibat pertukaran ion dalam proses penguraian sampah organik. Selain itu, konsentrasi parameter kimia seluruh sampel air tanah sudah sesuai dengan ketentuan kualitas air bersih dalam Permenkes No.416/MENKES/PER/IX/1990.

Kata kunci: interrelasi, air tanah, air lindi, isotop stabil, hidrokimia, TPST Piyungan

ABSTRACT

STUDY OF GROUNDWATER AND LEACHATE WATER INTERRELATION AT PIYUNGAN LANDFILL AREA IN YOGYAKARTA. It has been conducted groundwater study around TPST Piyungan, Special Region of Yogyakarta using stable isotope and hydrochemistry approximation method. The stable isotopes which used in the study are ^2H and ^{18}O . The study was conducted by taking a sample of leachate water as a contaminant and a number of groundwater samples that are around TPST Piyungan. Then, all samples were analyzed of environmental isotopes and hydrochemistry concentrations. The study aims is to determine the interrelation between the leachate water as a contaminant and groundwater around TPST Piyungan. Based on the analysis of stable isotopes ^2H and ^{18}O , the stable isotopes concentration of leachate water were more enrich caused by H_2S -exchange, otherwise the stable isotopes concentration of groundwater were more depleted. This indicated that there was no interrelation between groundwater and leachate water around TPST Piyungan. This was supported by the results of hydrochemical analysis which shows that generally the groundwater has a water type CaHCO_3 as freshwater, while the leachate water has type NaKHCO_3 as water that has undergone ion exchange as a result of engaging in the process of decomposition of organic waste. Moreover, the concentration of chemical parameters for entire groundwater samples were in accordance with the regulation of health minister No.416/MENKES/PER/IX/1990 for freshwater quality.

Keywords: interrelation, groundwater, leachate water, stable isotope, hydrochemistry, TPST Piyungan

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Ketersediaan air bersih merupakan salah satu kebutuhan vital bagi manusia. Air yang dimanfaatkan manusia untuk keperluan hidup sehari-hari adalah air dengan kualitas sesuai standar yang telah ditetapkan oleh pemerintah. Standar kualitas air didapatkan dari hasil riset yang sesuai dengan ilmu pengetahuan dan teknologi kesehatan, sehingga dapat memberikan jaminan bahwa air yang dimanfaatkan adalah air bersih dan layak untuk dikonsumsi. Bagi manusia, air bersih dibutuhkan untuk memenuhi

kebutuhannya seperti untuk sanitasi, air minum, kebutuhan bertani, kebutuhan industri dan kebutuhan sehari-hari lainnya. Air bersih terdapat pada beberapa sumber seperti danau, sungai, mataair, air tanah, dan lain sebagainya. Sumber-sumber air bersih ini berpotensi besar tercemar oleh limbah kegiatan manusia [1].

Limbah dari aktivitas pengelolaan Tempat Pembuangan Sampah Terpadu (TPST) merupakan salah satu kegiatan manusia yang berpotensi mencemari sumber-sumber air bersih. Kontaminasi air lindi dengan konsentrasi di atas jumlah konsentrasi yang telah ditetapkan oleh

pemerintah akan sangat berbahaya apabila sampai dikonsumsi penduduk sekitar. Kejadian masuknya (infiltrasi) air permukaan seperti luapan air sungai, banjir, turunnya air hujan dan lain sebagainya pada timbunan sampah mengakibatkan air permukaan bercampur dengan sampah. Zat-zat yang terdapat pada timbunan sampah terbilas dan terlarutkan oleh air permukaan tersebut sehingga dihasilkan air lindi. Air lindi (leachate) merupakan limbah cair berbahaya yang dapat mencemari sumber-sumber air bersih terutama air tanah. Air lindi yang merembes dari lapisan permukaan tanah menuju lapisan bawah tanah disebut dengan proses *leaching* [2].

Pada bulan April sampai dengan Oktober 2008, telah dilakukan penelitian di TPST Piyungan yang bertujuan untuk mengetahui dampak operasional pengelolaan sampah di TPST Piyungan terhadap kualitas air sumur penduduk di sekitarnya. Adapun parameter yang diamati mengacu pada Permenkes No.416/MENKES/PER/IX/1990 tentang syarat-syarat dan pengawasan kualitas air. Hasil uji kualitas akhir dianalisis secara deskriptif dengan membandingkan Baku Mutu Kualitas Air. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa parameter mikrobiologis yaitu *coliform* dan *eshercia coli* sampai melampaui baku mutu kualitas air [3].

Perbandingan penurunan kualitas air tanah di sekitar TPA berbasis *sanitary-landfill* dan *open-dumping* ditunjukkan dengan nilai isotop stabil yang mengalami pengayaan berikut perubahan konsentrasi ion-ion mayoritas dalam air tanah akibat pencampuran air lindi. Pemantauan isotop stabil dan hidrokimia pernah dilakukan di dua lokasi TPA yang berbeda, yaitu TPA Matang dan TPA Beriah, Perak, Malaysia untuk mengidentifikasi migrasi air lindi ke dalam air tanah dangkal. Serangkaian data hidrokimia secara menyeluruh dianalisis dengan menggunakan diagram piper dan hubungan isotop stabil. Parameter kimia air berupa ion-ion mayor (Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , HCO_3^- , Mg^{2+} , Na^+ , Ca^{2+} , dan K^+), sedangkan untuk isotop stabil terdiri dari $\delta^2\text{H}$ dan $\delta^{18}\text{O}$ [4].

Dengan latar belakang seperti di atas maka telah dilakukan penelitian kondisi air tanah dangkal di sekitar TPST Piyungan, yaitu dengan metode pendekatan isotop stabil ^2H dan ^{18}O yang divalidasi dengan analisis hidrokimia dan kemudian dibandingkan dengan baku mutu air sesuai peraturan pemerintah tentang kualitas air bersih.

Tujuan dan Ruang Lingkup

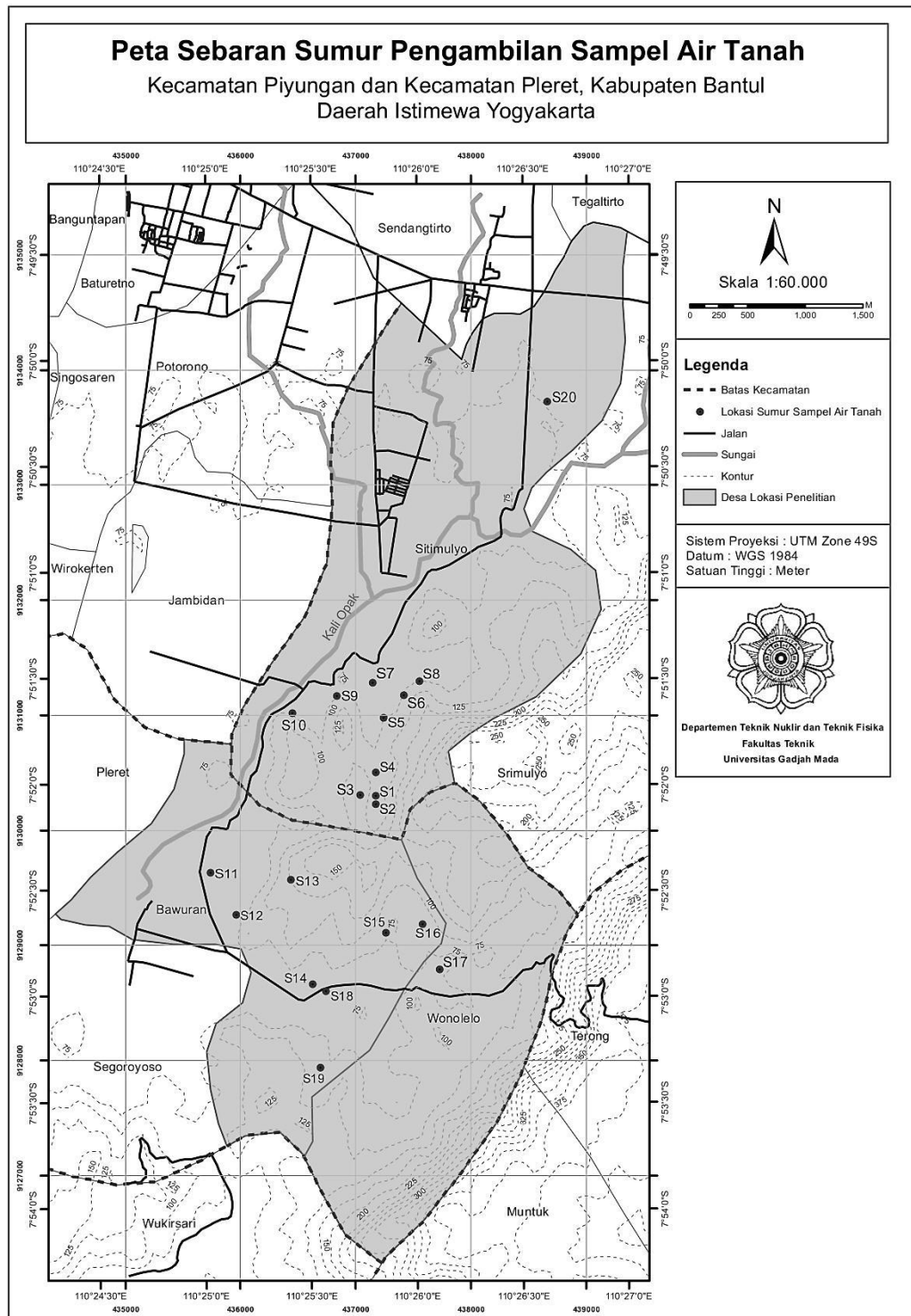
Penelitian ini mempunyai tujuan yaitu untuk mengetahui hubungan antara air tanah dengan air lindi sebagai kontaminan di sekitar TPST Piyungan terhadap kondisi air sejumlah sumur penduduk. Ruang lingkup penelitian ini dibatasi pada hal-hal sebagai berikut:

1. Analisis isotop stabil berdasarkan konsentrasi $\delta^2\text{H}$ dan $\delta^{18}\text{O}$ dari sampel air tanah (sumur penduduk) di sekitar TPST Piyungan terhadap garis meteorik air lokal.
2. Analisis hidrokimia yang dibatasi dengan parameter kualitas air yaitu ion yang dapat terlarut dalam air meliputi Na^+ (natrium), K^+ (kalium), Ca^{2+} (kalsium), Mg^{2+} (magnesium), SO_4^{2-} (sulfat), Cl^- (klorida), dan HCO_3^- (bikarbonat).
3. Data koordinat lokasi pengambilan sampel dari hasil *tagging* GPS yang ditandai pada perangkat lunak surfer dibutuhkan untuk memberi gambaran kontur muka air dan pergerakan air tanah di sekitar TPST Piyungan.

DESKRIPSI DAERAH PENELITIAN

Lokasi penelitian ini berlokasi di Tempat Pembuangan Sampah Terpadu (TPST) Piyungan. TPST Piyungan adalah TPA berbasis *sanitary-landfill*. Besarnya volume sampah dan curah hujan yang tinggi di sekitar TPST Piyungan berpotensi menghasilkan air lindi dalam jumlah besar dan merembes ke dalam tanah, serta mencemari air tanah. Tepatnya lokasi TPST Piyungan berada di Dusun Ngablak, Desa Sitimulyo, Kecamatan Piyungan, Kabupaten Bantul, sekitar 16 km sebelah tenggara kota Yogyakarta. Sampah buangan masyarakat dari tiga daerah yaitu Kota Yogyakarta, Kabupaten Sleman dan Kabupaten Bantul yang sehari dapat mencapai 5000 m³ sampah ditampung dan diolah di TPST Piyungan. TPST Piyungan merupakan titik akhir pembuangan sampah tiga daerah ini yang telah dibuka sejak tahun 1995 dan sampai saat ini mempunyai luas sebesar 10 hektar [5].

TPST Piyungan ini dilengkapi dengan Instalasi Pengolahan Air Lindi (IPAL) yang dikelola oleh pihak TPST. Pada penelitian ini, diambil sejumlah sampel air tanah yang berasal dari sumur pantau TPST dan sumur milik penduduk. Sementara itu, sampel air lindi (leachate water) diambil sebagai acuan kontaminan dalam penelitian ini. Peta selengkapnya mengenai lokasi dan titik pengambilan sampel dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Peta lokasi penelitian air tanah sekitar TPST Piyungan – DIY

METODOLOGI

Pengambilan Sampel

Pengambilan sampel dilakukan saat memasuki musim kemarau, pada tanggal 12 sampai dengan 13 Juni 2016. Prosedur tersebut dilakukan untuk menghindari

kontaminasi air hujan yang berlebihan dan dapat mempengaruhi analisis komposisi isotop sampel. Analisis komposisi isotop dilakukan di Laboratorium Kebumihan dan Lingkungan, Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi (PAIR), Badan Tenaga Nuklir

Nasional (BATAN), Jakarta. Sampel diambil di beberapa lokasi yang meliputi, sumur-sumur pantau, penampungan dan pengolahan lindi, dan sumur-sumur penduduk yang berada di daerah sekitar TPST Piyungan, Kabupaten Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta. Pengambilan air tanah berasal dari sumur gali dilakukan dengan cara ditimba, sedangkan untuk sampel air lindi dilakukan dengan cara diambil langsung dari penampungan lindi. Prosedur pengambilan sampel adalah sebagai berikut:

1. Koordinat dan elevasi lokasi titik pengambilan sampel ditandai dengan menggunakan alat *Global Positioning System* (GPS), kemudian ditentukan elevasi muka airnya.
2. Prediksi aliran air tanah dibuat berdasarkan data koordinat lokasi dan hasil perhitungan elevasi muka air (*water table*).
3. Untuk pengambilan sampel, bagian dalam botol yang digunakan sebagai wadah sampel dibilas sampel terlebih dahulu sekurang-kurangnya tiga kali. Hal ini bertujuan agar terhindar dari kontaminasi isotop lain yang akan mempengaruhi hasil.
4. Botol sampel dicelupkan seluruhnya pada badan air sampel untuk pengisian sampel. Setelah botol terisi penuh, botol ditutup dengan kondisi penutupan botol

juga dilakukan di dalam badan air. Proses ini bertujuan untuk mengurangi adanya gelembung udara yang akan terjebak di dalam botol.

5. Prosedur pengambilan sampel baik untuk uji isotop ataupun kimia air berlaku sama, adapun yang menjadi pembeda adalah kapasitas botol dan volume sampel yang dibutuhkan. Sampel yang digunakan untuk uji isotop stabil diambil sebanyak 20 ml, sedangkan sampel yang digunakan untuk uji kimia air diambil sebanyak 1000 ml.

Metode Isotop Stabil

Penelitian pada bidang hidrologi isotop yang sering digunakan adalah deuterium dan oksigen-18. Isotop-isotop yang lebih ringan (¹H) mempunyai kelimpahan yang relatif lebih besar dibandingkan dengan isotop-isotop yang lebih berat (²H), begitu juga untuk ¹⁶O mempunyai kelimpahan yang lebih besar dibandingkan ¹⁸O. Perbandingan antara isotop berat dengan isotop ringan ditentukan dalam perbedaan rasio, seperti ²H/¹H dan ¹⁸O/¹⁶O. Perbandingan komposisi isotop dinyatakan sebagai δ (delta) dan dinyatakan dalam satuan permil (‰). Untuk deviasi isotop deuterium dinyatakan dengan δ²H dan untuk deviasi isotop oksigen-18 dinyatakan dengan δ¹⁸O. Nilai *Standard Mean Ocean Water* (SMOW) ditunjukkan pada Tabel 1 sebagai berikut [6]:

Tabel 1. Komposisi isotop referensi standar internasional

	Rasio, H/L	Nilai, H/L	% H	% L
<i>Standard Mean Ocean Water</i> (SMOW)	² H/ ¹ H	0,00015576	0,015574	99,984426
	¹⁷ O/ ¹⁶ O	0,0003799	0,03790	99,76206
	¹⁸ O/ ¹⁶ O	0,0020052	0,20004	99,76206

Keterangan: H = isotop berat dan L = isotop ringan

Air dengan deuterium lebih rendah dibandingkan SMOW mempunyai δ²H negatif, sedangkan air dengan deuterium lebih tinggi dibandingkan SMOW mempunyai δ²H positif. Hal ini berlaku sama untuk δ¹⁸O. Hubungan komposisi isotop stabil dalam molekul air dituliskan dalam Persamaan (i) dan (ii) [7]:

$$\delta^2H\text{‰} = \left(\frac{\left(\frac{^2H}{^1H}\right)_{\text{sampel}} - \left(\frac{^2H}{^1H}\right)_{\text{SMOW}}}{\left(\frac{^2H}{^1H}\right)_{\text{SMOW}}} \right) \times 1000 \tag{i}$$

$$\delta^{18}O\text{‰} = \left(\frac{\left(\frac{^{18}O}{^{16}O}\right)_{\text{Sampel}} - \left(\frac{^{18}O}{^{16}O}\right)_{\text{SMOW}}}{\left(\frac{^{18}O}{^{16}O}\right)_{\text{SMOW}}} \right) \times 1000$$

(ii)

Dalam hal ini,

- δ^2H : Perbandingan selisih rasio isotop sampel dan standar dengan rasio isotop standar untuk deuterium dalam permil
- $\delta^{18}O$: Perbandingan selisih rasio isotop sampel dan standar dengan rasio isotop standar untuk oksigen-18 dalam permil
- $\left(\frac{^2H}{^1H}\right)_{\text{Sampel}}$: Rasio isotop berat (2H) dengan isotop ringan (1H) pada sampel air tanah
- $\left(\frac{^{18}O}{^{16}O}\right)_{\text{Sampel}}$: Rasio isotop berat (^{18}O) dengan isotop ringan (^{16}O) pada sampel air tanah
- $\left(\frac{^2H}{^1H}\right)_{\text{SMOW}}$: Rasio isotop berat (2H) dengan isotop ringan (1H) pada SMOW
- $\left(\frac{^{18}O}{^{16}O}\right)_{\text{SMOW}}$: Rasio isotop berat (^{18}O) dengan isotop ringan (^{16}O) pada SMOW

Meteoric Water Line adalah suatu hubungan garis linear antara nilai kelimpahan $\delta^{18}O$ dan δ^2H pada air hujan yang membentuk suatu grafik. Hubungan antara nilai $\delta^{18}O$ dan δ^2H yang didapatkan dari 400 sampel air sungai, danau dan presipitasi yang di ambil dari berbagai negara. Dari grafik tersebut akan dihasilkan suatu persamaan yang menunjukkan hubungan antara δ^2H dan $\delta^{18}O$ seluruh dunia yang disebut *Global Meteoric Water Line* (GMWL) [8]:

$$\delta^2H = 8\delta^{18}O + 10\text{‰}$$

(iii)

Metode Hidrokimia

Pengukuran parameter kimia air berupa konsentrasi klorida, bikarbonat, kalsium, dan magnesium dilakukan dengan memasukkan sampel ke Laboratorium Teknik Penyehatan dan Lingkungan, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada. Di samping itu, sampel untuk uji konsentrasi kalium, natrium, dan sulfat dimasukkan ke

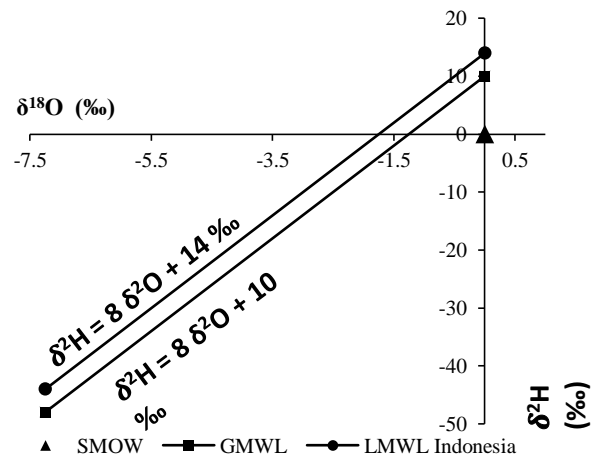
Garis GMWL menggambarkan perilaku isotop dalam kurun waktu yang lama di berbagai tempat di seluruh dunia. Nilai ini mungkin akan berbeda untuk tiap daerah, sehingga ada yang disebut dengan *Local Meteoric Water Line* (LMWL) yang spesifik untuk daerah tertentu. LMWL adalah hubungan antara rasio konsentrasi isotop deuterium dan oksigen-18 perairan daratan pada elevasi-elevasi yang berbeda di suatu daerah tertentu dengan konsentrasi isotop deuterium dan oksigen-18 standar di lautan [7].

Indonesia juga mempunyai persamaan *meteoric water line* sendiri yang merupakan hasil penelitian BATAN melalui stasiun penadah hujan di Indonesia. Persamaan grafik LMWL Indonesia, yakni [9]:

$$\delta^2H = 8\delta^{18}O + 14\text{‰}$$

(iv)

Berdasarkan Persamaan (iii) dan (iv) dapat dibuat perbandingan grafik GMWL dengan LMWL Indonesia. Grafik ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Perbandingan GMWL dengan LMWL Indonesia

Laboratorium Hidrologi dan Kualitas Air, Fakultas Geografi Universitas Gadjah Mada. Hasil pengukuran konsentrasi parameter kimia air dibandingkan dengan baku mutu kualitas air bersih menurut Permenkes No.416/MENKES/PER/IX/1990 ditunjukkan pada Tabel 3.

Analisis kimia yaitu ion kation natrium dan kalium menggunakan metode uji flamefotometrik, kalsium dan magnesium

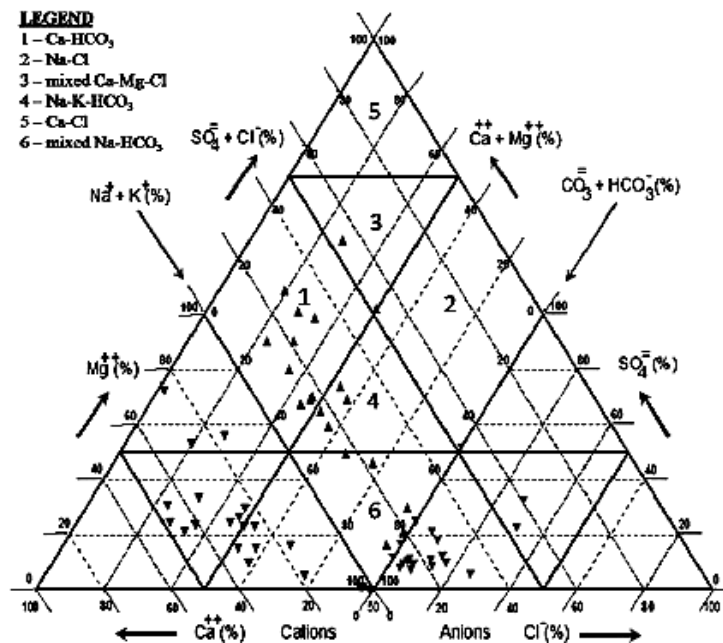
menggunakan metode spektrofotometri serapan atom (AAS), sedangkan untuk sulfat dilakukan analisis dengan metode turbidimetri, klorida secara titrimetri argentometri, dan bikarbonat dengan metode titrimetri asam basa [10].

Analisis kimia air mempunyai tujuan memberi informasi tentang kondisi kualitas air untuk keperluan tertentu. Untuk keperluan minum, air harus mempunyai komposisi kimia sesuai dengan standar yang ditetapkan, terutama dari aspek kesehatan. Kualitas air alami mempunyai parameter-parameter tertentu, salah satunya adalah keberadaan ion-ion mayor. Ion mayor dikenal sebagai ion yang mempunyai presentase besar terlarut dalam air. Unsur atau ion mayor ini biasanya mempunyai konsentrasi di atas 1 mg/L atau 1 ppm yang terlarut dalam air, sedangkan ion-ion minor mempunyai konsentrasi sekitar 1 µg/L atau 1 ppb [11].

Air mengandung garam terlarut, terdisosiasi menjadi kation (ion bermuatan positif) dan anion (ion bermuatan negatif). Kation terlarut yang paling umum adalah natrium (Na^+), kalsium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), dan kalium (K^+). Anion yang paling umum adalah klorida (Cl^-), bikarbonat (HCO_3^-), dan sulfat (SO_4^{2-}). Komposisi air

tanah tersebut mempunyai konsentrasi ion yang berbeda dan rentang nilai yang bervariasi [12].

Diagram piper adalah kombinasi segitiga-segitiga anion dan kation. Sebuah belah ketupat (*diamond*) di antara segitiga anion-kation digunakan untuk menganalisis TDS (*Total Dissolved Solids*). Bagian belah ketupat diagram piper dapat digunakan untuk menentukan karakteristik atau tipe air. Ada empat jenis air sesuai letak kuadran diagram piper tersebut. Air yang terletak pada kuadran-3 mempunyai kandungan tinggi campuran ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$) dan ($\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$) yang menunjukkan bahwa air bertipe kesadahan permanen (*permanent hardness*). Tipe air yang terletak di kuadran-1 kaya akan kandungan ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$) dan HCO_3^- disebut sebagai air berjenis kesadahan sementara (*temporary hardness*) yang merupakan karakteristik *freshwater*. Tipe air yang terletak pada kuadran-4 terdiri dari alkali karbonat ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$ dan $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$), sedangkan tipe air yang berada pada kuadran-2 diagram piper mengandung ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$) dan ($\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$) dapat dianggap mengandung garam atau biasa disebut *saline* [13]. Tipe air berdasarkan diagram piper ditunjukkan Gambar 3.

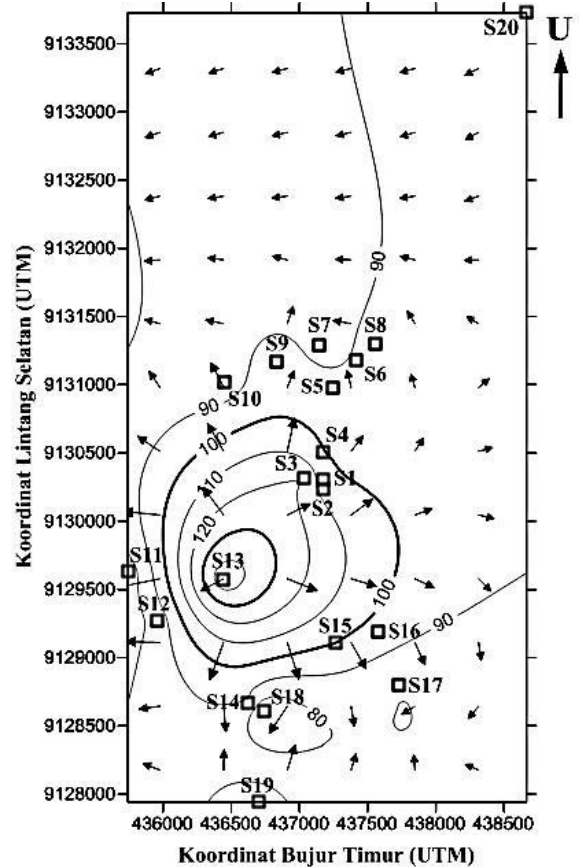


Gambar 3. Diagram piper untuk menentukan tipe air tanah

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pola Aliran Air Tanah

Pengambilan sampel penelitian dilakukan di lokasi-lokasi sekitar TPST Piyungan, Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta meliputi Kecamatan Piyungan dan Pleret sebanyak 20 titik pada tiga desa, yaitu Desa Sitimulyo (S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, S9, S10, S20), Desa Bawuran (S11, S12, S13, S14, S15, S16, S18, S19), dan Desa Wonolelo (S17). Berdasarkan hasil simulasi perangkat lunak *Golden Surfer 13*, air tanah pada lokasi sampel dengan elevasi tertinggi (S13) mengalir menuju TPST dan lokasi-lokasi sampel di bagian utara TPST (S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, S9, S10). Sumur pantau 1 (S2) dan sumur pantau 2 (S3) mendapatkan aliran air tanah yang berasal dari sumur penduduk (S13). Aliran air tanah dari S2 dan S3 menuju sumur pantau 3 (S4), sumur pantau 4 (S5), sumur pantau 5 (S6) dan sekitar S8 (sumur penduduk), kemudian berbelok ke arah barat menuju sumur pantau 6 (S7), serta mengarah ke utara lagi dan berangsur-angsur mengarah ke arah barat. Semakin ke arah utara, pergerakan air tanah semakin cenderung berbelok ke wilayah di bagian barat barat-laut TPST. Pada lokasi sampel terjauh dari TPST (S20) dapat dilihat bahwa mempunyai pola pergerakan air tanah mengalir dari arah utara menuju ke arah barat daya terhadap lokasi S20. Hasil simulasi water table dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Prediksi pola arah aliran air tanah sekitar TPST Piyungan

Namun demikian, analisis yang diperoleh berdasarkan simulasi *water table* menggunakan perangkat lunak *Golden Surfer 13* masih belum dapat menentukan suatu lokasi air tanah saling mempunyai interkoneksi dengan air tanah di lokasi lainnya atau tidak. Untuk menentukan hal itu dilakukan analisis isotop stabil dengan menganalisis deuterium dan oksigen-18, sehingga dapat diketahui lokasi mana saja yang saling mempunyai interkoneksi air tanah satu sama lainnya.

Analisis Isotop ^2H dan ^{18}O

Pada Tabel 2 diperlihatkan hasil analisis isotop stabil ^2H dan ^{18}O dari sampel-sampel air yang diambil dari lokasi penelitian sekitar TPST Piyungan.

Tabel 2. Hasil analisis isotop stabil $\delta^2\text{H}$ dan $\delta^{18}\text{O}$

No.	Kode	$\delta^2\text{H}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)
1	S1	-16,11	-4,59
2	S2	-38,51	-6,14
3	S3	-37,04	-5,81
4	S4	-36,84	-5,99
5	S5	-38,32	-6,46
6	S6	-49,96	-7,46
7	S7	-31,32	-5,15
8	S8	-37,13	-6,23
9	S9	-41,84	-7,03
10	S10	-38,34	-5,74
11	S11	-30,57	-6,10
12	S12	-33,14	-6,61
13	S13	-34,87	-7,87
14	S14	-37,81	-8,19
15	S15	-46,58	-8,50
16	S16	-39,36	-8,55
17	S17	-40,09	-8,01
18	S18	-36,57	-7,34
19	S19	-35,36	-7,76
20	S20	-44,14	-8,13

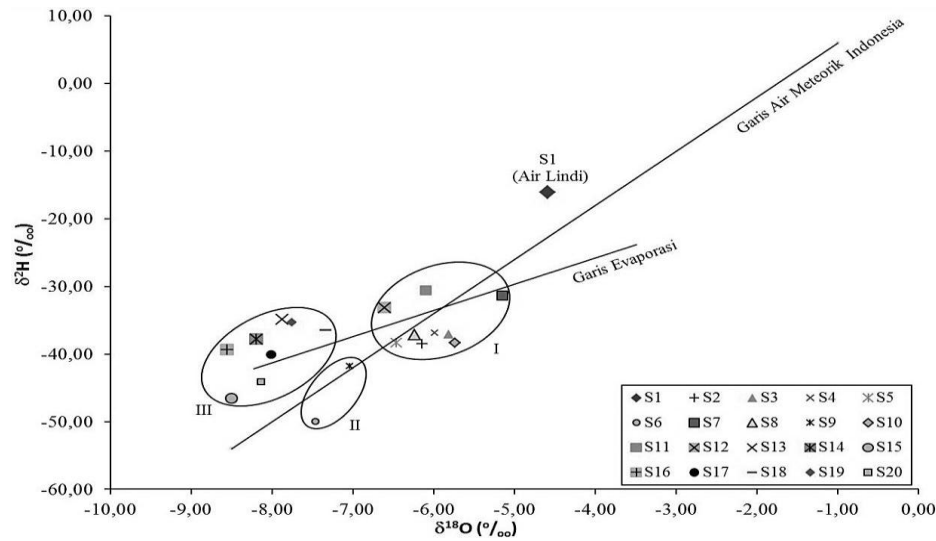
Berdasarkan grafik ^2H dan ^{18}O karakteristik air tanah yang diambil di sekitar TPST Piyungan dapat dijelaskan bahwa hampir semua sampel berasal dari daerah *recharge* (resapan) yang sama, yaitu di sekitar S4 dan S11, kecuali sampel S1, S6 dan S9. Hal yang membedakan adalah selama perjalanannya melalui batuan, masing-masing mengalami perubahan komposisi isotop stabil $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$ dari asalnya. Berdasarkan karakteristiknya, air tanah yang berada di sekitar TPST Piyungan dapat dikelompokkan menjadi tiga, yaitu :

1. Grup I: jika dilihat pada grafik hubungan $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$, air tanah pada grup ini dianggap sebagai komposisi awal yang mengindikasikan asal air tanah untuk sebagian besar air tanah di area TPST Piyungan. Air tanah pada grup ini meliputi S2, S3, S4, S5, S7, S8, S10, S11 dan S12. Namun

demikian, air tanah S7 pada grup ini terindikasi mengalami proses evaporasi atau interaksi dengan air permukaan (air rawa, air sungai) yang ada di sekitarnya.

2. Grup II: air tanah grup ini meliputi S6 dan S9. Air tanah S9 tepat berada di garis meteorik yang mengindikasikan bahwa air tanah ini tidak mengalami pertukaran isotop dengan batuan yang dilaluinya. Sementara air tanah S6, meskipun berasal dari daerah imbuhan yang sama dengan S9, tetapi dalam perjalanannya melalui batuan mengalami pertukaran dengan isotop ^2H dari *clay* (lempung) dan dari grafik hubungan $\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^2\text{H}$ terindikasi sebagai air tanah berumur relatif tua jika dibandingkan dengan air tanah lainnya yang ada di sekitar TPST Piyungan. Daerah imbuhan air tanah pada grup ini diperkirakan berasal dari elevasi yang paling tinggi dibandingkan air tanah lainnya.
3. Grup III: air tanah pada grup ini telah mengalami pergeseran komposisi isotop ^2H dan ^{18}O menjadi lebih miskin atau *depleted* dibandingkan komposisi awalnya, yaitu Grup I. Semula air tanah pada grup ini mempunyai kesamaan asal dengan Grup I, namun dalam perjalanannya melalui batuan mengalami pertukaran isotop dengan CO_2 atau CO_2 -exchange. Air tanah yang termasuk dalam grup ini meliputi S15, S20, S17, S16, S14, S13, S19 dan S18.

Dari grafik hubungan $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$, terlihat bahwa S1 mempunyai konsentrasi isotop $\delta^2\text{H}$ dan $\delta^{18}\text{O}$ paling kaya atau *enrich* dibandingkan air tanah di sekitarnya. Hal ini disebabkan adanya interaksi antara air tanah dengan air lindi melalui pertukaran isotop ^2H dari H_2O (air tanah) dengan isotop ^2H dari H_2S . Senyawa H_2S ini merupakan hasil dari proses pembusukan sampah. S1 ini dianggap sebagai *end-member* atau kontaminan dalam penelitian ini. Dari semua sampel air tanah yang diambil, tidak ada satupun yang mengalami interaksi dengan air tanah sekitarnya. Penentuan karakteristik air tanah ini divalidasi melalui data hidrokimia (anion-kation).



Gambar 5. Grafik hubungan $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ air tanah sekitar TPST Piyungan

Analisis Hidrokimia

Pada Tabel 3 diperlihatkan hasil analisis hidrokimia (anion-kation) air tanah dan air lindi. Dari hasil analisis hidrokimia tersebut tampak bahwa air lindi mempunyai

konsentrasi anion-kation yang tinggi dibandingkan air tanah di sekitarnya. Sementara itu, konsentrasi anion-kation air tanah secara keseluruhan masih dalam batas normal.

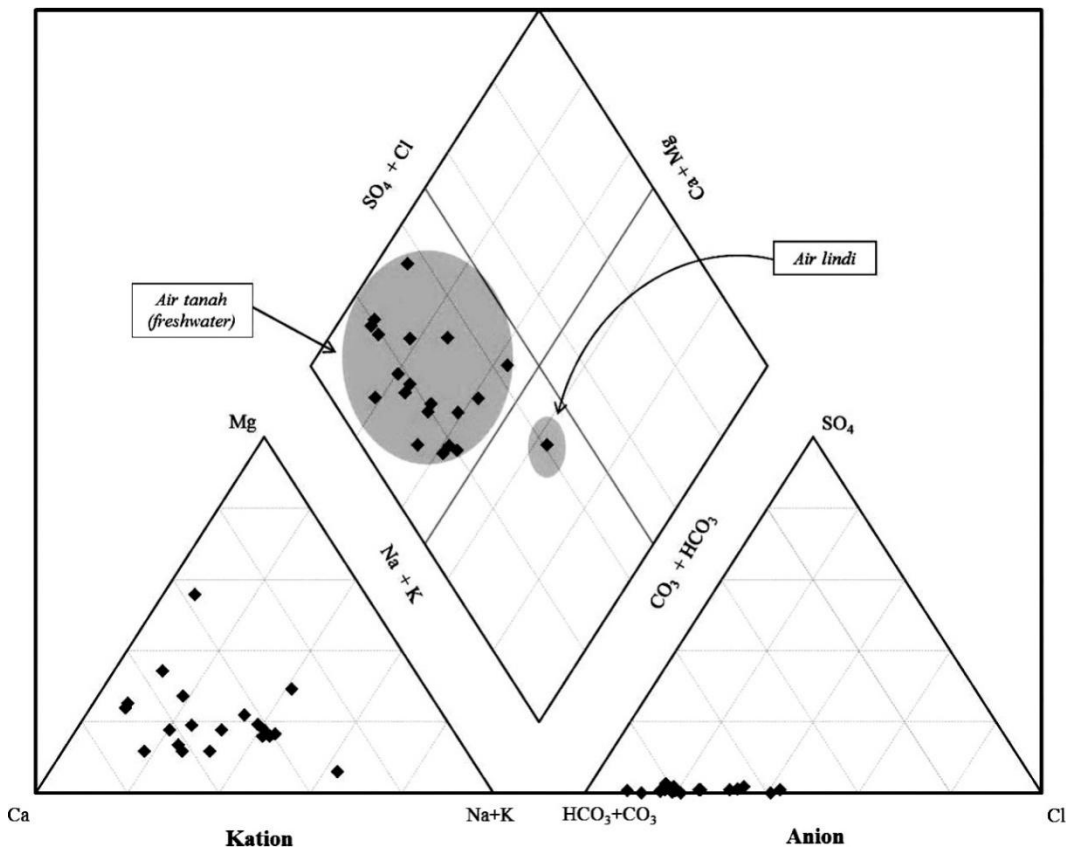
Tabel 3. Hasil analisis hidrokimia (anion-kation)

No.	Kode	Na (ppm)	K (ppm)	Ca (ppm)	Mg (ppm)	Cl (ppm)	SO ₄ (ppm)	HCO ₃ (ppm)
1	S1 (Air Lindi)	1010,86	1008,27	496,83	95,39	2015	0,00	2925,00
2	S2	63,62	45,88	150,64	28,14	199,7	5,72	397,10
3	S3	44,88	7,19	44,52	18,84	77,93	1,99	168,33
4	S4	73,58	6,01	69,65	26,95	148,43	3,10	197,78
5	S5	30,63	5,50	48,49	16,93	50,72	0,01	189,28
6	S6	53,74	30,10	54,45	20,51	68,40	0,72	288,25
7	S7	70,22	27,67	49,68	49,36	78,16	1,38	392,70
8	S8	38,18	4,86	47,70	24,09	37,22	0,01	261,20
9	S9	22,12	6,96	56,04	12,16	40,95	1,83	180,43
10	S10	14,62	9,15	44,12	12,64	36,29	1,58	171,63
11	S11	48,11	42,48	42,93	18,12	65,83	1,99	267,93
12	S12	31,60	9,75	71,94	24,32	55,83	2,19	284,22
13	S13	25,99	8,74	101,75	16,69	85,62	3,00	257,12
14	S14	16,24	6,04	46,90	23,61	27,92	1,99	274,91
15	S15	21,78	6,11	37,76	7,87	32,57	1,63	142,16
16	S16	47,95	6,15	51,27	23,61	72,35	2,04	213,34
17	S17	9,69	9,41	50,08	31,24	52,58	3,50	232,89
18	S18	5,13	17,62	27,03	40,30	86,08	4,11	162,44
19	S19	3,91	4,21	34,58	12,88	32,57	2,84	137,53
20	S20	3,70	26,12	32,19	11,21	25,59	3,96	125,34
Baku Mutu		(-)	(-)	(-)	(-)	600	400	(-)

Berdasarkan data kimia air yang ditunjukkan melalui diagram piper terlihat bahwa hampir semua tipe air berada di kuadran-1 atau mempunyai tipe air CaHCO_3 yang merupakan ciri dari air tanah tawar (*freshwater*) yang berasal dari air tanah dangkal. Sedangkan air lindi (*leachate water*) berada di kuadran-4 atau mempunyai tipe NaKHCO_3 yang merupakan air yang telah mengalami pencampuran sebagai akibat pertukaran ion yang terjadi dalam

proses penguraian sampah organik. Terdapat beberapa sampel seperti S3, S4, S6, S7, S11 dan S16 yang posisinya dalam diagram piper mendekati *end member* dari air lindi.

Selain itu, dari karakteristik air lindi pada penelitian ini juga menunjukkan bahwa TPST Piyungan merupakan TPST yang tergolong tua (umur TPST > 5 tahun) dan pengelolaan TPST berbasis *sanitary-landfill* yang telah dilakukan pada TPST Piyungan berjalan dengan baik [14].



Gambar 6. Diagram piper air tanah di sekitar TPST Piyungan

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan evaluasi data yang telah diperoleh, dapat diambil kesimpulan bahwa tidak ada satu pun sampel air tanah di sekitar TPST Piyungan yang mengalami interrelasi dengan air lindi. Hal ini ditunjukkan dari grafik isotop stabil $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$. Kemudian, didukung pula dengan hasil analisis hidrokimia melalui diagram piper bahwa secara umum air tanah yang berada di sekitar TPST Piyungan merupakan air tanah tawar atau *freshwater* dengan tipe air CaHCO_3 yang berasal dari air tanah dangkal,

sedangkan air lindi mempunyai tipe NaKHCO_3 yang merupakan air hasil pencampuran akibat pertukaran ion dalam proses penguraian sampah organik. Selain itu, konsentrasi parameter kimia air seluruh sampel air tanah juga sesuai dengan baku mutu kualitas air bersih Permenkes No.416/MENKES/PER/IX/1990. Dengan demikian, tidak ada air tanah terkontaminasi oleh air lindi yang berasal dari TPST Piyungan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Pada kesempatan ini, terima kasih diucapkan kepada analis di Laboratorium Hidrologi, Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi – BATAN atas bantuannya dalam menganalisis sampel-sampel.

DAFTAR PUSTAKA

1. Saparuddin. "Pemanfaatan Airtanah Dangkal Sebagai Sumber Air Bersih di Kampus Bumi Bahari Palu". *Jurnal SMARTek*, 8:143-152, 2010.
2. Bob Ritter. *Interactions Within Ecosystems*. Nelson Thomson Learning, Scarborough Ontario, 1999.
3. Suhartini. "Naskah Jurnal Saintek 2008: Pengaruh Keberadaan Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Sampah Piyungan Terhadap Kualitas Air Sumur Penduduk Di Sekitarnya". *Laporan Penelitian*, Jurusan Pendidikan Biologi, FMIPA Universitas Negeri Yogyakarta, Yogyakarta, 2008.
4. Syafalni S., Mohd. Hafiz Zawawi dan Ismail Abustan. "Isotopic and Hydrochemistry Fingerprinting of Leachate Migration in Shallow Groundwater at Controlled and Uncontrolled Landfill Sites". *World Applied Sciences Journal* 31, 6:1198-1206, 2014.
5. Administrator Situs. *TPA Piyungan Siapa Yang Mau?*. Kementerian Pekerjaan Umum Direktorat Jenderal Cipta Karya, 2013. Diakses dari <http://ciptakarya.pu.go.id/andal/content/tpa-piyungan-siapa-yang-mau>, 26 Januari 2016.
6. Brian Fry. *Stable Isotope Ecology*. Springer, New York, 2006.
7. Emanuel Mazor. *Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology*, 3rd Edition. Marcel Dekker Inc., New York, 2004.
8. Craig H. "Isotopic Variations in Natural Waters". *Journal of Science*, 133:1702-1703, 1961.
9. Bungkus Pratikno dan Paston Sidauruk. "Mempelajari Hubungan Air di Danau Toba dengan Air di Beberapa Sumber Mata Air Dekat Danau Toba". *Jurnal Ilmiah Aplikasi Isotop dan Radiasi*, Vol. 11, 2:153-159, 2015.
10. Sudaryanto dan Rachmat Fajar Lubis. "Penentuan Lokasi Imbuhan Airtanah dengan Pelacak Isotop Stabil ^{18}O dan ^2H di Cekungan Airtanah Dataran Rendah Semarang, Jawa Tengah". *Riset Geologi dan Pertambangan*, 21:121-129, Jakarta, 2011.
11. B.B.S. Singhal dan R.P. Gupta. *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks*, 2nd Edition. Springer, New York, 2010.
12. Lyle S. Raymond JR. "What is Groundwater?". *Bulletin No. 1 New York State Water Resources Institute Center for Environmental Research*, Cornell University, hal. 1-11, Juli 1988.
13. Arthur W. Hounslow. *Water Quality Data: Analysis and Interpretation*. Lewis Publisher, Washington D.C., 1995.
14. Abdulhussain A. Abbas, Guo Jingsong, Liu Zhi Ping, Pan Ying Ya, dan Wisaam S. Al-Rekabi. "Review on Landfill Leachate Treatments". *Journal of Applied Sciences Research*, 5(5):534-545, 2009.

Tanya - Jawab

Pertanyaan 1.

Dari : Tri Sulistiyo Hari Nugroho

Pertanyaan : Bagaimana penentuan adanya intereksi/ hubungan antara air tanah dengan air lindih dari data yang diperoleh.

Jawaban : isotop stabil (deuterium, oksigen-18) merepresentasikan DNA atau sidik jari dari air satu ke air lainnya, apabila memiliki kedekatan nilai komposisi (D, ^{18}O) maka dapat dipastikan bahwa air tersebut dari aliran yang sama atau terjadi mixing (pencampuran). Akan tetapi dari data yang diperoleh menunjukkan bahwa air tanah tidak mempunyai nilai komposisi yang dekat atau diperkaya (enrichment) oleh air lindih. Kemudian validasi kimia air dilakukan dan ternyata semua air masih bertipe air bersih dari air tanah dangkal melalui diagram pipernya.

INFRASTRUKTUR KESELAMATAN DEKOMISIONING FASILITAS NUKLIR DI INDONESIA

Reno Alamsyah, Agus Yudhi Pristianto
P2STPIBN BAPETEN. Jl. Gajah Mada No. 8. Jakarta 10120.
r.alamsyah@bapeten.go.id

ABSTRAK

INFRASTRUKTUR KESELAMATAN DEKOMISIONING FASILITAS NUKLIR DI INDONESIA. Telah dilakukan suatu kajian mengenai infrastruktur peraturan perundang-undangan (PUU) untuk memastikan keselamatan dalam dekomisioning fasilitas nuklir di Indonesia. Sebagaimana diketahui, satu-satunya pengalaman dekomisioning terkait nuklir yang pernah dilakukan adalah untuk fasilitas Pemurnian Asam Fosfat PT. Petrokimia Gresik. Sejauh ini, fasilitas nuklir di Indonesia sendiri belum ada yang melaksanakan dekomisioning. Namun, hal itu tidak berarti tidak akan pernah ada, apalagi semua fasilitas yang ada saat ini sudah berusia lebih dari 20 tahun. Bahkan, reaktor nuklir pertama di Indonesia yang berada di Bandung sudah dioperasikan lebih dari 50 tahun. Dekomisioning dapat saja terjadi dalam waktu yang tidak lama dari saat ini, misalnya ketika terjadi kecelakaan yang parah. Dengan demikian, masalah yang dihadapi adalah: "Bagaimana mengetahui kecukupan infrastruktur keselamatan dekomisioning di Indonesia?" Sehingga, penting bagi kita untuk secara berkala mengevaluasi dan meningkatkan infrastruktur keselamatan dekomisioning. Metode yang digunakan dalam pengkajian ini adalah dengan membandingkan regulasi yang ada di Indonesia dengan berbagai standar IAEA secara analitik, kualitatif dan/atau deskriptif. Berdasarkan analisis celah tersebut dapat disimpulkan bahwa PUU di Indonesia telah memenuhi sebagian besar persyaratan standar IAEA. Selain itu, didapatkan pula beberapa tantangan dan peluang untuk peningkatan, antara lain tentang perlunya: kebijakan nasional mengenai keselamatan dekomisioning; PUU yang lebih menjamin kesetaraan antar generasi dan prinsip 'pencemar membayar'; dan PUU mengenai pendanaan untuk membangun kompetensi, dan penelitian dan pengembangan terkait kegiatan dekomisioning. Beberapa pedoman juga perlu dikembangkan, seperti mengenai: pelaksanaan pendekatan bertingkat, perkiraan biaya dekomisioning, penilaian kemudahan dekomisioning atas suatu disain fasilitas nuklir, dan penggunaan statistik untuk mendemonstrasikan bahwa tingkat klierens telah tercapai.

Kata Kunci: Regulasi, Keselamatan, Dekomisioning, Fasilitas Nuklir,

ABSTRACT

DECOMMISSIONING SAFETY INFRASTRUCTURE OF NUCLEAR FACILITIES IN INDONESIA. An assessment of regulatory infrastructure has been carried out to ensure the safety in decommissioning of nuclear facilities in Indonesia. As it is well known, the only nuclear-related decommissioning experience was performed at the Phosphoric Acid Purification facility of PT. Petrokimia Gresik. So far, none of nuclear facilities in Indonesia have implemented decommissioning. However, that does not mean that there we will never do this, let alone all existing facilities are aged more than 20 years. In fact, the first nuclear reactor in Indonesia located in Bandung has been operated for more than 50 years. Decommissioning may take place in the not-too-distant future, for example when a severe accident occurs. Thus, the problem encountered is: "How to ensure the adequacy of decommissioning safety infrastructure in Indonesia?" Hence, it is important for us to periodically evaluate and improve the decommissioning safety infrastructure. The method used in this assessment is to compare the existing regulations in Indonesia with various IAEA standards in an analytic, qualitative and/or descriptive manner. Based on this gap analysis, it can be concluded that the Indonesian regulation comply with most of the IAEA standard requirements. In addition, there are also several challenges and opportunities for improvement, including the need for: national policy on the safety of decommissioning; regulation that guarantees intergenerational equity and the principle of 'polluter pays'; and, regulation on funding to build competence, and research and development related to decommissioning activities. Some guidelines also need to be developed, such as: the implementation of a graded approach, the cost estimates of decommissioning, the assessment of the practicality of decommissioning of a nuclear facility design, and the use of statistics to demonstrate that the clearance level has been achieved.

Keywords: Regulation, Safety, Decommissioning, Nuclear Facility.

PENDAHULUAN

Pemegang Izin operasi wajib mengajukan permohonan izin Dekomisioning secara tertulis kepada Kepala BAPETEN paling singkat tiga tahun sebelum izin operasi berakhir [1]. Demikian salah satu persyaratan mengenai dekomisioning antara lain diatur dalam Peraturan Pemerintah (PP) No. 2 Tahun 2014 tentang

Perizinan Instalasi Nuklir. Peraturan perundang-undangan (PUU) mengenai dekomisioning di Indonesia memang sudah cukup lengkap, tertuang mulai dari Undang-undang (UU), PP, hingga ke Peraturan Kepala (Perka) BAPETEN. PUU merupakan infrastruktur yang sangat penting dalam menjamin keselamatan dekomisioning.

Satu-satunya pengalaman dekomisioning terkait nuklir yang pernah dilakukan di Indonesia adalah untuk fasilitas Pemurnian Asam Fosfat PT. Petrokimia Gresik [2]. Sejauh ini, fasilitas nuklir di Indonesia belum ada yang melaksanakan dekomisioning. Namun, hal itu tidak berarti tidak akan pernah ada yang akan melakukannya, sebab semua fasilitas yang ada sudah berusia lebih dari 30 tahun. Bahkan, reaktor nuklir pertama yang ada di Bandung, TRIGA-2000, sudah dioperasikan lebih dari 50 tahun [3]. Dekomisioning dapat saja terjadi dalam waktu yang tidak lama dari saat ini, misalnya ketika terjadi kecelakaan yang parah.

Sesuai standar IAEA GSR Part 6 “*Decommissioning of Facilities*” [4], dekomisioning pun seharusnya sudah direncanakan pada tahap awal penentuan tapak dan desain fasilitas nuklir. Hal ini adalah karena pada dasarnya ada tiga prinsip utama terkait dengan keberlanjutan kegiatan nuklir dan harus dituangkan dalam aturan dekomisioning [5]:

1. Keselamatan generasi sekarang dan mendatang;
2. Memastikan tersedia dan dilestarikannya sumber daya keuangan, teknis dan ilmiah untuk dekomisioning fasilitas nuklir dan remediasi lokasi yang terkontaminasi (misalnya dengan membangun prinsip ‘pencemar membayar’ atau *‘the polluter pays’*); dan,
3. Kesetaraan antar generasi, yang menuntut bahwa generasi yang menimbulkan kewajiban jangka panjang harus bertanggung jawab, dan menyediakan sumber daya yang tepat untuk mengelola kewajiban ini dengan cara yang tidak akan memberikan beban yang tidak semestinya pada generasi mendatang.

Di sisi lain, dekomisioning juga memiliki aspek sosio-ekonomis yang perlu diperhitungkan. Dokumen teknis lain yang diterbitkan IAEA [6] mengulas secara mendalam dampak sosio-ekonomis dari proyek dekomisioning, baik dampak negatif maupun yang positif; Dilihat dari aspek ketenagakerjaan, pada lingkup komunitas lokal maupun untuk komunitas yang lebih luas. Berbagai studi di Amerika juga menunjukkan bahwa dekomisioning fasilitas nuklir berdampak positif secara ekonomi [7, 8, 9]. Bagaimanapun juga, perlu digarisbawahi bahwa ‘penghentian akhir dari suatu masa operasi fasilitas merupakan kegiatan industri yang wajar, dan konsekuensi sosio-ekonomi merupakan hal yang tak terhindarkan’ [6].

Kembali ke Indonesia, walaupun Indonesia belum akan melaksanakan dekomisioning dalam waktu dekat ini, Indonesia tentu tidak terbebas dari masalah tersebut. Dengan demikian, masalah yang dihadapi adalah: “Bagaimana mengetahui kecukupan infrastruktur keselamatan dekomisioning di Indonesia?” Sehingga, penting bagi kita untuk secara berkala mengevaluasi dan meningkatkan infrastruktur keselamatan dekomisioning. Paper ini mengkaji status terkini infrastruktur keselamatan dekomisioning fasilitas nuklir di Indonesia dengan menggunakan standar internasional. Melalui kajian ini, diharapkan infrastruktur keselamatan dekomisioning dapat ditingkatkan sehingga siap ketika nantinya akan diperlukan.

METODOLOGI

Kajian dilakukan secara bertahap sbb:

1. Telaah deskripsi persyaratan keselamatan yang dimuat dalam standar utama yang diterbitkan IAEA untuk dekomisioning, yaitu GSR Part 6;
2. Studi perbandingan secara analitik dan kualitatif atas persyaratan-persyaratan tersebut terhadap kandungan persyaratan keselamatan yang termuat dalam berbagai PUU yang ada di Indonesia;
3. Melalui analisis celah (*gap analysis*) seperti itu, dilakukan pembahasan dan penarikan kesimpulan.

PUU yang dikaji pada makalah ini adalah semua yang terkait keselamatan dan dekomisioning, yaitu:

1. Undang-undang No. 10 Tahun 1997 tentang Ketenaganukliran [10];
2. PP No. 33 Tahun 2007 tentang Keselamatan Radiasi Pengion dan Keamanan Sumber Radioaktif [11];
3. PP No. 54 Tahun 2012 tentang Keselamatan dan Keamanan Instalasi Nuklir [12];
4. PP No. 61 Tahun 2013 tentang Pengelolaan Limbah Radioaktif [13];
5. PP No. 2 Tahun 2014 tentang Perizinan Instalasi Nuklir [3];
6. Perka No. 4 Tahun 2009 tentang Dekomisioning Reaktor Nuklir [14];
7. Perka No. 6 Tahun 2011 tentang Dekomisioning Instalasi Nuklir Nonreaktor [15];
8. Perka No. 4 Tahun 2013 tentang Proteksi dan Keselamatan Radiasi dalam Pemanfaatan Tenaga Nuklir [16]; dan
9. Perka No. 7 Tahun 2013 tentang Nilai Batas Radioaktivitas Lingkungan [17].

Sebagaimana diketahui, GSR Part 6 terdiri atas 8 bagian dengan 15 persyaratan. Pada setiap bagian, masing-masing persyaratan tersebut akan digunakan untuk mengkaji kecukupan PUU tersebut di atas dalam memenuhinya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berikut disajikan telaah persyaratan keselamatan dari standar IAEA [4] dan uraian mengenai kandungan PUU di Indonesia yang mengatur mengenai persyaratan tersebut.

Proteksi terhadap manusia dan perlindungan terhadap lingkungan hidup

Persyaratan IAEA

Ada tiga persyaratan umum yang diuraikan dalam [4] dalam hal proteksi terhadap manusia dan perlindungan terhadap lingkungan hidup dari bahaya radiasi, yaitu:

1. Optimisasi proteksi dan keselamatan dalam dekomisioning;
2. Pendekatan bertingkat (*graded approach*) dalam dekomisioning; dan,
3. Penilaian keselamatan dekomisioning.

Penjelasan untuk ketiga hal tersebut di atas adalah sebagai berikut. Dalam hal Optimisasi, paparan selama dekomisioning harus dianggap sebagai situasi paparan terencana dan persyaratan yang sesuai dari ketentuan keselamatan radiasi harus diterapkan selama dekomisioning. Tentu saja Optimisasi, yang dilaksanakan melalui penetapan pembatas dosis, tidak dapat berjalan sendiri tanpa adanya ketentuan mengenai Limitasi. Proteksi radiasi harus diterapkan pada semua kegiatan yang direncanakan, dan penerimaan paparan harus diupayakan untuk dikurangi jika terjadi kecelakaan. Akhirnya, proteksi terhadap lingkungan hidup juga harus dilaksanakan selama proses dekomisioning, dan juga setelahnya jika fasilitas tersebut akan dibebaskan dari pengawasan dengan pembatasan untuk pemanfaatan lain di masa depan.

Untuk pendekatan bertingkat, hal ini harus diterapkan pada semua aspek dekomisioning dalam menentukan ruang lingkup dan tingkat kerincian setiap fasilitas tertentu, dan harus konsisten dengan besarnya resiko radiasi yang mungkin timbul dari kegiatan dekomisioning. Dengan demikian, tipe informasi dan tingkat kerincian yang harus disampaikan kepada badan pengawas disesuaikan dengan tipe, skala, kerumitan, status dan tahapan usia fasilitas, dan dengan potensi bahaya yang dihadapi dalam dekomisioning fasilitas. Demikian pula tindakan pengawasan hendaknya

disesuaikan dengan potensi bahaya dan risiko yang dihadapi selama dekomisioning.

Mengenai penilaian keselamatan, proses ini harus dilakukan untuk semua fasilitas yang merencanakan dan melaksanakan dekomisioning. Penilaian keselamatan menjadi bagian yang paling penting dalam dokumen Rencana Akhir Dekomisioning. Disarankan, penilaian keselamatan disusun berdasarkan standar IAEA GSR Part 4 [18], dan seharusnya dilakukan untuk menganalisis semua tindakan dan insiden yang mungkin terjadi selama dekomisioning.

PUU di Indonesia

PUU di Indonesia telah mengatur mengenai kewajiban melaksanakan optimisasi melalui pembatas dosis yang nilainya ditetapkan oleh Pemegang Izin (PI) dan telah disetujui BAPETEN. Pemantauan radioaktivitas lingkungan juga wajib dilaksanakan oleh PI selama usia fasilitas, termasuk pada tahap dekomisioning. Secara administratif, PI wajib menyusun, mengembangkan, melaksanakan, dan mendokumentasikan Program Proteksi dan Keselamatan Radiasi, yang juga merupakan salah satu syarat untuk memperoleh izin dekomisioning. Dengan demikian, persyaratan optimisasi proteksi dan keselamatan dalam dekomisioning telah secara menyeluruh diuraikan dalam PUU Indonesia.

PUU di Indonesia juga telah secara eksplisit memanfaatkan pendekatan bertingkat. Perka-perka yang mengatur dekomisioning reaktor nuklir maupun instalasi nuklir nonreaktor menyatakan bahwa ketentuan di dalam Perka tersebut dilaksanakan berdasarkan pada pendekatan bertingkat bergantung pada kerumitan/kompleksitas dari fasilitas itu sendiri. Namun, belum ada penjelasan atau pedoman yang lebih rinci untuk pelaksanaan dekomisioning, pengawasan dan komunikasinya, terutama terkait dengan konsistensi terhadap besarnya resiko radiasi yang mungkin timbul dari dekomisioning.

PUU di Indonesia mengatur bahwa PI harus menyusun Program Dekomisioning (PD), yang dalam bahasa IAEA disebut sebagai Rencana Dekomisioning, sejak mulai mengajukan izin konstruksi. PD berisi analisis dan penilaian keselamatan, serta wajib dikaji ulang dan dimutakhirkan secara berkala pada tahap komisioning, setiap lima tahun selama operasi, dan selama pelaksanaan dekomisioning itu sendiri. PD menjadi bagian dari Laporan Analisis Keselamatan yang juga secara berkala harus dikaji ulang dan dimutakhirkan oleh PI. Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa

persyaratan mengenai penilaian keselamatan dekomisioning yang ditetapkan dalam standar IAEA [4] telah dituangkan secara menyeluruh dalam PUU yang ada di Indonesia.

Pembagian tanggung-jawab

Persyaratan IAEA

Tanggung jawab secara nasional dalam dekomisioning diberikan kepada tiga entitas utama, yaitu: Pemerintah, Badan Pengawas (BP) dan Pemegang Izin (PI). Pemerintah harus menetapkan dan memelihara kerangka kerja pemerintahan, hukum dan PUU yang mengatur bahwa semua aspek dekomisioning, termasuk pengelolaan limbah radioaktif yang dihasilkan, dapat direncanakan dan dilakukan secara selamat. Kerangka kerja ini harus mencakup alokasi tanggung jawab yang jelas, penyediaan fungsi pengawasan yang mandiri dan persyaratan sehubungan dengan jaminan keuangan untuk dekomisioning.

BP harus mengatur semua aspek dekomisioning untuk setiap tahap di sepanjang usia fasilitas, dari perencanaan awal dekomisioning selama penentuan tapak dan desain fasilitas, hingga penyelesaian tindakan dekomisioning dan penghentian otorisasi untuk dekomisioning. BP harus menetapkan persyaratan keselamatan untuk dekomisioning, kecukupan sumber daya (manusia, finansial dan teknologi), termasuk persyaratan untuk pengelolaan limbah radioaktif yang dihasilkan. BP juga harus mengambil tindakan untuk memastikan terpenuhinya persyaratan PUU.

PI harus merencanakan dekomisioning dan wajib melaksanakan dekomisioning sesuai dengan otorisasi yang diberikan untuk dekomisioning dan dengan persyaratan yang berasal dari PUU nasional. PI wajib bertanggung jawab untuk semua aspek keselamatan, proteksi radiasi dan perlindungan terhadap lingkungan hidup selama dekomisioning.

PUU di Indonesia

Indonesia telah menetapkan kerangka PUU di bidang ketenaganukliran yang juga mengatur mengenai dekomisioning. Indonesia juga telah membentuk BAPETEN sebagai BP yang independen, memisahkan antara fungsi promosi/eksekusi dan pengawasan. Indonesia juga telah memiliki fasilitas pengelolaan limbah radioaktif yang dioperasikan oleh BATAN di Serpong. Yang saat ini belum ada dalam kerangka PUU adalah kebijakan nasional yang berdiri sendiri mengenai keselamatan dekomisioning, yang seharusnya antara lain memuat prinsip-prinsip sebagaimana diuraikan

pada Bab I dengan tetap menjunjung tinggi Budaya Keselamatan.

Meskipun demikian, sistem perizinan dekomisioning telah diatur secara cukup rinci, dilengkapi dengan persyaratan teknis maupun administratif. PUU juga mengatur semua kewajiban PI dalam hal melakukan pengelolaan dekomisioning sebagaimana diuraikan dalam standar IAEA.

Manajemen dekomisioning

Persyaratan IAEA

PI harus menetapkan dan melaksanakan Sistem Manajemen Terintegrasi (SMT) yang meliputi seluruh aspek dekomisioning. Standar IAEA GSR Part 2 [19] atau yang setara harus digunakan sebagai acuan, beserta standar teknis lain yang sesuai. Setiap orang yang terlibat dalam dekomisioning harus memiliki keahlian, kepakaran dan pelatihan yang dibutuhkan untuk melakukan pekerjaannya sesuai dengan prosedur tertulis yang menjamin keselamatan.

PUU di Indonesia

SMT telah diatur sebagai persyaratan keselamatan maupun perizinan dalam dekomisioning. Seluruh fasilitas nuklir yang ada di Indonesia telah menetapkan dan melaksanakan SMT untuk tahapan operasi. Dengan demikian, penerapan dan pengawasan SMT pada tahap dekomisioning akan menjadi tantangan tersendiri. Apalagi, tujuan akhir dari SMT adalah Budaya Keselamatan, yang dalam hal ini belum ada pedoman internasional untuk pelaksanaannya pada tahap dekomisioning.

Strategi dekomisioning

Persyaratan IAEA

PI harus menentukan strategi dekomisioning yang akan menjadi dasar perencanaan dekomisioning. Strategi ini harus konsisten dengan kebijakan nasional pengelolaan limbah radioaktif, terjustifikasi, dan diharapkan merupakan pembongkaran segera jika secara praktis memungkinkan.

PUU di Indonesia

Sejalan dengan standar IAEA, PUU menentukan bahwa dalam keadaan normal PI harus mengutamakan pembongkaran segera (*immediate dismantling*). Meskipun demikian, tetap dibuka peluang untuk melaksanakan strategi pembongkaran tunda (*deferred dismantling*) dengan pertimbangan tertentu, atau

bahkan penguburan (*entombment*), yaitu dalam hal terjadi kecelakaan parah.

Hal yang berpotensi bermasalah dengan PUU adalah bahwa PUU menyatakan bahwa dalam kondisi kecelakaan parah dan seluruh limbah radioaktif tidak dapat dipindahkan dari fasilitas nuklir, maka "PI harus memilih hanya opsi penguburan". Hal ini menutup peluang untuk mengupayakan pembongkaran yang lebih menjamin keselamatan generasi saat ini maupun yang akan datang.

PUU juga menyatakan bahwa "Dalam hal opsi penguburan yang dipilih, PI wajib menyerahkan tanggung jawab penanganan limbah radioaktif kepada Badan Tenaga Nuklir Nasional sesuai dengan ketentuan PUU". Hal ini berpotensi berlawanan dengan prinsip 'pencemar membayar' dan bahwa tanggung-jawab keselamatan tidak dapat dialihkan.

Keadaan akhir (*end-state*) yang dipilih dalam PUU adalah *green field*, manakala dinyatakan bahwa pembebasan hanya dapat diberikan setelah tingkat klierens tercapai pada gedung dan tapak fasilitas nuklir.

Pendanaan dekomisioning

Persyaratan IAEA

Tanggung jawab dalam hal penyediaan dana untuk dekomisioning harus diatur dalam PUU nasional. Ketentuan ini harus mencakup penetapan mekanisme penyediaan sumber daya keuangan yang memadai untuk menjamin keselamatan dalam dekomisioning, dan untuk memastikan bahwa dana tersebut tersedia ketika diperlukan, termasuk jika terjadi suatu keadaan yang memaksa dilaksanakannya dekomisioning secara dini. Perpanjangan izin juga harus mensyaratkan adanya jaminan finansial untuk melaksanakan dekomisioning.

PUU di Indonesia

Jaminan finansial dalam berbagai bentuk untuk pelaksanaan dekomisioning adalah salah satu persyaratan mulai dari izin komisioning. Besarnya jaminan finansial dihitung berdasarkan perkiraan biaya yang diajukan. Namun, PUU terkait pendanaan belum secara rinci mengatur dana yang harus disediakan oleh PI untuk membangun kompetensi, dan melakukan penelitian dan pengembangan terkait kegiatan dekomisioning yang harus dilaksanakannya. Pedoman untuk melakukan perkiraan biaya dekomisioning juga belum tersedia.

Perencanaan dekomisioning di sepanjang usia fasilitas

Persyaratan IAEA

PI harus menyiapkan rencana dekomisioning dan harus menjaganya sepanjang usia fasilitas, melakukan pembaharuan secara berkala, sesuai dengan persyaratan dari badan pengawas, untuk menunjukkan bahwa dekomisioning dapat dilaksanakan dengan selamat hingga mencapai keadaan akhir sebagaimana telah ditetapkan. Pada tahap penentuan tapak, PI harus melakukan survey latar belakang termasuk kondisi radiologis yang digunakan sebagai data dasar. Untuk fasilitas yang baru, dekomisioning harus diperhitungkan dalam pembuatan desain fasilitas, dan rencana dekomisioning harus disampaikan dalam rangka memenuhi persyaratan izin operasi.

Sebelum pelaksanaan tindakan dekomisioning, rencana akhir dekomisioning harus disiapkan dan disampaikan kepada badan pengawas untuk persetujuan. Dokumen tersebut paling kurang berisi strategi dekomisioning; jadwal, tipe dan urutan tindakan dekomisioning; strategi pengelolaan limbah termasuk klierens, keadaan akhir yang diusulkan dan cara PI mendemonstrasikan bahwa keadaan tersebut telah tercapai; penyimpanan dan pembuangan limbah yang berasal dari dekomisioning; jadwal (*time-frame*) dekomisioning secara keseluruhan; dan pendanaan.

PUU di Indonesia

Sebagaimana diuraikan pada Pasal 2.1, PD menjadi persyaratan mulai dari permohonan izin konstruksi. PD wajib dikaji ulang dan dimutakhirkan secara berkala pada tahap komisioning, setiap lima tahun selama operasi, dan selama pelaksanaan dekomisioning itu sendiri. PD harus mendapat persetujuan BP sebelum dilaksanakan. Format dan isi PD yang harus disusun PI adalah sesuai dengan persyaratan IAEA.

PUU menyatakan bahwa persyaratan umum desain meliputi pula desain untuk kemudahan dekomisioning. Namun, belum ada kriteria untuk menentukan 'mudah' atau 'tidak mudah'. Untuk itu, suatu pedoman penilaian kemudahan dekomisioning atas suatu desain fasilitas nuklir perlu dibuat.

PUU juga memberi persyaratan mengenai pengukuran paparan latar belakang pada tahap penentuan tapak, dan mengenai klierens untuk pembebasan tapak. Namun belum ada pedoman mengenai penggunaan statistik guna mendemonstrasikan bahwa tingkat klierens telah tercapai.

Pelaksanaan dekomisioning

Persyaratan IAEA

Ketika rencana akhir dekomisioning telah disetujui oleh BP, maka PI harus melaksanakan rencana tersebut, termasuk pengelolaan limbah radioaktif, sesuai dengan peraturan nasional. Bila PI memilih strategi dekomisioning tertunda, maka PI wajib menjamin bahwa fasilitas dalam konfigurasi yang menjamin keselamatan, sedemikian sehingga dekomisioning dan/atau pembongkaran nantinya dapat dilakukan. PI juga wajib mendokumentasikan struktur, sistem dan komponen (SSK) yang penting bagi keselamatan. Di sisi lain, BP harus melakukan inspeksi untuk memastikan bahwa PI melaksanakan rencana akhir dekomisioning dan semua persyaratan terpenuhi.

Dalam melaksanakan dekomisioning, maka suatu pengaturan tanggap darurat yang sesuai dengan potensi bahayanya harus ditetapkan dan dipelihara. Pengaturan ini harus disusun berdasarkan standar IAEA GSR Part 7 [20]. Setiap kejadian yang penting bagi keselamatan harus dilaporkan kepada badan pengawas secara tepat waktu.

Limbah radioaktif harus dikelola untuk semua aliran limbah yang berasal dari dekomisioning.

PUU di Indonesia

Untuk bagian ini PUU telah memenuhi persyaratan IAEA, termasuk dalam hal pengelolaan limbah radioaktif, dan pengaturan tanggap darurat serta pelaporannya. PUU juga mengamanatkan kepada BATAN untuk penyediaan tempat penyimpanan limbah radioaktif tingkat rendah dan sedang, dan penyimpanan lestari limbah radioaktif tingkat tinggi.

Penyelesaian dekomisioning dan pembebasan izin dekomisioning

Persyaratan IAEA

Penyelesaian tindakan dekomisioning dan penghentian otorisasi untuk dekomisioning. Pada saat tindakan dekomisioning selesai, pemegang izin harus menunjukkan bahwa kriteria keadaan akhir yang ditentukan dalam rencana akhir dekomisioning dan setiap persyaratan peraturan tambahan telah dipenuhi. Badan pengawas harus memverifikasi kepatuhan terhadap kriteria keadaan akhir dan harus membuat keputusan penghentian otorisasi untuk dekomisioning.

PUU di Indonesia

Bagian ini telah didiskusikan pada pasal-pasal sebelumnya. Yang berpotensi menjadi persoalan di masa yang akan datang adalah pembuktian bahwa tingkat klierens telah tercapai. Untuk itu dibutuhkan pedoman statistik yang memadai sebagai bagian penting dalam pengambilan keputusan penghentian otorisasi untuk dekomisioning.

KESIMPULAN

1. Secara umum, sebagian besar persyaratan keselamatan yang ditetapkan dalam standar IAEA mengenai dekomisioning telah dipenuhi dalam berbagai produk PUU yang ada di Indonesia;
2. Keadaan akhir (*end-state*) yang dipilih dalam PUU adalah *green field*, yaitu bahwa pembebasan hanya dapat diberikan setelah tingkat klierens tercapai pada gedung dan tapak fasilitas nuklir;
3. Beberapa celah PUU yang ditemukan dalam kajian ini antara lain adalah mengenai: perlunya kebijakan nasional keselamatan dekomisioning yang antara lain memuat prinsip-prinsip dasar dekomisioning dan Budaya Keselamatan; PUU yang lebih menjamin kesetaraan antar generasi dan prinsip 'pencemar membayar' dalam hal dekomisioning fasilitas pasca kecelakaan parah; dan PUU yang mengatur pendanaan untuk membangun kompetensi, dan penelitian dan pengembangan terkait kegiatan dekomisioning;
4. Untuk memudahkan pelaksanaan dan pengawasan dekomisioning, diperlukan juga beberapa pedoman yang saat ini belum ada, seperti mengenai: pelaksanaan pendekatan bertingkat dan SMT, perkiraan biaya dekomisioning, penilaian kemudahan dekomisioning atas suatu disain fasilitas nuklir, dan penggunaan statistik untuk mendemonstrasikan bahwa tingkat klierens telah tercapai; dan,
5. PUU yang menyatakan bahwa 'PI harus memilih hanya opsi penguburan dalam kondisi kecelakaan parah dan seluruh limbah radioaktif tidak dapat dipindahkan dari fasilitas nuklir' kurang membuka peluang untuk mengupayakan pembongkaran dan berpotensi

berlawanan dengan prinsip ‘pencemar membayar’.

DAFTAR PUSTAKA

1. Republik Indonesia, Peraturan Pemerintah No. 2 Tahun 2014 tentang Perizinan Instalasi Nuklir, Jakarta, (2014).
2. Zainus Salimin, dkk., Dekomisioning Fasilitas Pemurnian Asam Fosfat Petrokimia Gresik, ISSN 1410-6086, Jakarta (2008).
3. <http://www.batan.go.id/index.php/id/home/sejarah>. Diakses pada tanggal 4 Agustus 2017.
4. IAEA, *GSR Part 6 Decommissioning of Facilities*, Vienna, (2014).
5. IAEA, *NW-T-1.10 Advancing Implementation of Decommissioning and Environmental Remediation Programmes*, Vienna, (2016).
6. IAEA, *TRS 464 Managing the Socioeconomic Impact of the Decommissioning of Nuclear Facilities*, Vienna. (2008).
7. Kenneth D. Riener, *The Local Economic Impacts of Decommissioning the Diablo Canyon Power Plant*, San Luis Obispo, (2010).
8. Mark Berkman, *The Economic Impacts of Decommissioning Vermont Yankee*, _____, (2016).
9. Grangeston, *The Socio-Economic Impacts of Dounreay Decommissioning*, _____, (2012).
10. Republik Indonesia, Undang-undang No. 10 Tahun 1997 tentang Ketenaganukliran, Jakarta, (1997).
11. Republik Indonesia, Peraturan Pemerintah No. 33 Tahun 2007 tentang Keselamatan Radiasi Pengion dan Keamanan Sumber Radioaktif, Jakarta, (2007).
12. Republik Indonesia, Peraturan Pemerintah No. 54 Tahun 2012 tentang Keselamatan dan Kemanan Instalasi Nuklir, Jakarta, (2012).
13. Republik Indonesia, Peraturan Pemerintah No. 61 Tahun 2013 tentang Pengelolaan Limbah Radioaktif, Jakarta., (2013);
14. Republik Indonesia, Peraturan Kepala BAPETEN No. 4 Tahun 2009 tentang Dekomisioning Reaktor Nuklir, Jakarta, (2009).
15. Republik Indonesia, Peraturan Kepala BAPETEN No. 6 Tahun 2011 tentang Dekomisioning Instalasi Nuklir Nonreaktor, Jakarta, (2011).
16. Republik Indonesia, Peraturan Kepala BAPETEN No. 4 Tahun 2013 tentang Proteksi dan Keselamatan Radiasi dalam Pemanfaatan Tenaga Nuklir, Jakarta, (2013).
17. Republik Indonesia, Peraturan Kepala BAPETEN No. 7 Tahun 2013 tentang Nilai Batas Radioaktivitas Lingkungan, Jakarta, (2013).
18. IAEA, *GSR Part 4 Safety Assessment for Facilities and Activities*, Vienna, (2009).
19. IAEA, *GSR Part 2 Leadership and Management for Safety*, Vienna, (2016).
20. IAEA, *GSR Part 7 Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency*, Vienna, (2015).

PENILAIAN POSTUR KERJA PADA PROSES PENGOLAHAN LIMBAH RADIOAKTIF DI PUSAT TEKNOLOGI LIMBAH RADIOAKTIF DENGAN METODE REBA

Atikah Safitri¹, Moch Romli²

¹Program Studi Kesehatan Masyarakat, Fak. Kedokteran & Kesehatan, Universitas Muhammadiyah Jakarta

²Pusat Teknologi Limbah Radioaktif – BATAN, Gd. 50 Kawasan PUSPIPTEK Serpong

atikahsafitri21@gmail.com

ABSTRAK

PENILAIAN POSTUR KERJA PADA PROSES PENGOLAHAN LIMBAH RADIOAKTIF DI PUSAT TEKNOLOGI LIMBAH RADIOAKTIF DENGAN METODE REBA. Sistem kerja yang tidak ergonomi seringkali kurang mendapat perhatian atau dianggap tidak penting, sebagai contoh adalah pada cara, sikap dan posisi kerja yang tidak benar, fasilitas kerja yang tidak sesuai, dan faktor lingkungan kerja yang kurang mendukung. Pekerja menjadi sumber daya penting yang harus dikelola dan dijaga dengan baik, baik dari segi kompetensi dan kesehatannya. Diperlukan evaluasi terhadap sikap dan postur kerja yang dapat berpengaruh terhadap kualitas hidup dan kesehatan pekerja, serta secara tidak langsung dapat mempengaruhi produktivitas dari pekerjaan yang dilakukan. *Rapid Entire Body Assessment (REBA)* merupakan metode perhitungan ergonomi yang bertarget pada postur untuk mengestimasi risiko dari penyakit tubuh secara keseluruhan yang berhubungan dengan pekerjaan (*work-related entire body disorders*). Dari penelitian yang dilakukan, didapatkan beberapa postur kerja dalam proses pengelolaan limbah radioaktif yang berada pada level risiko tinggi. Dengan hasil penilaian tersebut dapat diupayakan pengendalian dan pencegahan risiko dengan beberapa cara, baik dengan penggunaan alat bantu, intervensi perbaikan postur kerja, ataupun sosialisasi terkait postur kerja ideal.

Kata Kunci : postur kerja, ergonomi, REBA, risiko

ABSTRACT

WORK POSTURE ASSESSMENT IN THE PROCESS OF RADIOACTIVE WASTE TREATMENT ON CENTER FOR RADIOACTIVE WASTE TECHNOLOGY WITH REBA METHOD. Non-ergonomic work systems are often under-paid or considered unimportant, for example in improper ways, attitudes and work positions, unsuitable work facilities, and less supportive work environment factors. Workers become important resources that must be managed and maintained well, both in terms of competence and health. An evaluation of attitudes and postures that may affect the quality of life and health of workers, and indirectly can affect the productivity of the work performed. Rapid Entire Body Assessment (REBA) is a targeted ergonomic calculation method for posture to estimate the risk of whole-body-related body disorders (work-related throughout body disorders). From the research done, got some work posture in process of radioactive waste management which is at high risk level. With the results of the assessment can be pursued risk control and prevention in several ways, either with the use of tools, interventions improvement work postures, or socialization related to the ideal work posture.

Keywords : work posture, ergonomics, REBA, risk

PENDAHULUAN

Sistem kerja yang tidak ergonomi seringkali kurang mendapat perhatian atau dianggap tidak penting, sebagai contoh adalah pada cara, sikap dan posisi kerja yang tidak benar, fasilitas kerja yang tidak sesuai, dan faktor lingkungan kerja yang kurang mendukung. Hal ini secara sadar maupun tidak akan berpengaruh terhadap produktifitas, efisiensi dan efektifitas pekerja dalam menyelesaikan pekerjaannya [1]. Menurut Tarwaka [2], 50-60% cedera pinggang disebabkan karena aktivitas mengangkat dan menurunkan material. Umumnya nyeri pinggang disebabkan oleh masalah pekerjaan berat yang berhubungan dengan *manual material handling*, seperti mengangkat, menurunkan, mendorong, dan menarik beban berat atau lamanya membengkokkan badan, membungkuk, duduk, dan berdiri terlalu lama atau postur batang tubuh

lainnya yang janggal dapat menyebabkan cedera pada tulang belakang [3]. Cara kerja harus dilakukan dengan benar, sebab cara kerja yang tidak benar dari segi ergonomi dapat menyakibatkan risiko gangguan kesehatan, penyakit bahkan juga kecacatan [4].

Menurut Stephen Konz, dalam Kumar (1999) [5], yang dimaksud dengan postur adalah susunan dari tubuh yang terdiri atas kepala, batang tubuh, dan lengan dalam ukuran jarak dan dimensi. Pada dasarnya setiap orang memiliki keinginan untuk melakukan kegiatan dalam postur yang optimal. Postur kerja sangatlah erat kaitannya dengan keilmuan ergonomi untuk meningkatkan kesejahteraan fisik dan mental melalui upaya pencegahan cedera akibat postur kerja yang salah dan penyakit akibat kerja serta menurunkan beban kerja fisik dan mental. Oleh karena itu perlu dipelajari tentang bagaimana

suatu postur kerja dikatakan efektif dan efisien untuk mendapatkan postur kerja yang baik dengan tujuan dapat menganalisa dan mengevaluasi postur kerja yang salah dan kemudian mampu memberikan postur kerja usulan yang lebih baik sebab masalah postur kerja sangatlah penting untuk diperhatikan karena langsung berhubungan dengan proses operasi itu sendiri, dengan postur kerja yang salah serta dalam jangka waktu yang lama dapat mengakibatkan beberapa gangguan kesehatan dan gangguan-gangguan lainnya yang dapat mengakibatkan jalannya proses produksi tidak optimal [6].

Pusat Teknologi Limbah Radioaktif (PTLR) mempunyai tugas melaksanakan penelitian dan pengembangan teknologi pengelolaan limbah radioaktif. Setiap proses kegiatan pengolahan limbah radioaktif sangat mungkin memiliki potensi bahaya ergonomi yang dapat berisiko khususnya pada proses menggunakan peralatan kerja manual untuk terjadinya berbagai macam gerakan berulang dan posisi janggal lainnya, hingga tanpa disadari pekerja melakukan postur kerja yang tidak ergonomis. Oleh karena itu diperlukannya suatu penilaian terhadap postur kerja menggunakan metode *Rapid Entire Body Assessment (REBA)* dengan memperhatikan postur tubuh (leher, batang tubuh, kaki, lengan bagian atas, lengan bagian bawah, dan pergelangan tangan). Metode *REBA* telah dikembangkan oleh Dr. Sue Hignett dan Dr. Lynn McAtamney ahli ergonomi di Nottingham, Inggris. *REBA* adalah metode perhitungan ergonomi yang bertarget pada postur untuk mengestimasi risiko dari penyakit tubuh

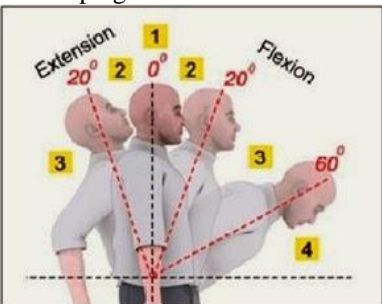
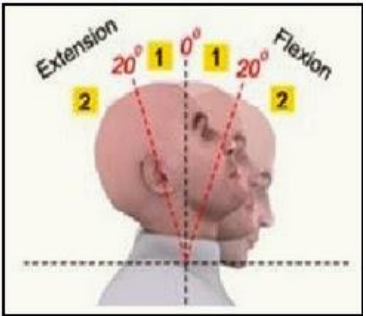
secara keseluruhan yang berhubungan dengan pekerjaan (*work-related entire body disorders*). Metode *REBA* memberikan penilaian yang cepat dan sistematis untuk seluruh aktivitas tubuh, baik statis maupun dinamis, selain itu metode ini juga dipengaruhi oleh faktor *coupling*, beban eksternal yang di topan oleh tubuh serta aktivitas pekerja [7].


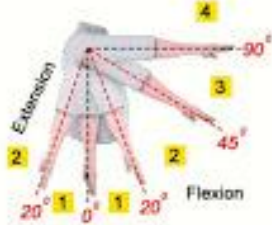
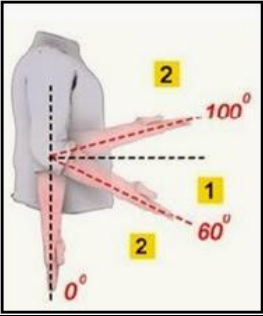
METODOLOGI

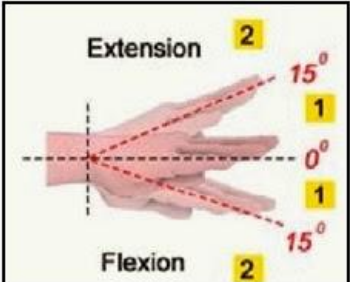
Penelitian ini merupakan penelitian deskriptif kuantitatif, dengan teknik penelitian mengamati (observasi) secara langsung. Metode yang digunakan yaitu *Rapid Entire Body Assessment (REBA)*, metode ini dipilih karena dapat menilai postur seluruh tubuh seorang pekerja dengan cepat dan sistematis baik dalam pekerjaan statis maupun pekerjaan yang dinamis untuk mengetahui gambaran postur tubuh para pekerja terhadap proses pengolahan limbah. Pekerja radiasi di PTLR menjadi populasi dalam penelitian ini, dengan sampel sebanyak 35 orang.

Postur tubuh pekerja saat melakukan aktivitas kegiatan pengolahan limbah radioaktif akan dinilai berdasarkan metode *REBA*. Foto postur pekerja tersebut diukur dengan busur derajat untuk mengetahui sudut yang akan dinilai menggunakan lembar penilaian *REBA*, dari posisi leher hingga kaki. Setelah mendapatkan hasil skor *REBA* dapat dikategorikan ke dalam level risiko dan dapat mengetahui perlu tidaknya dilakukan perbaikan. Penilaian ini didasarkan pada variabel penelitian dan definisi operasional pada Tabel 1.

Tabel 1. Variabel Penelitian dan Definisi Operasional

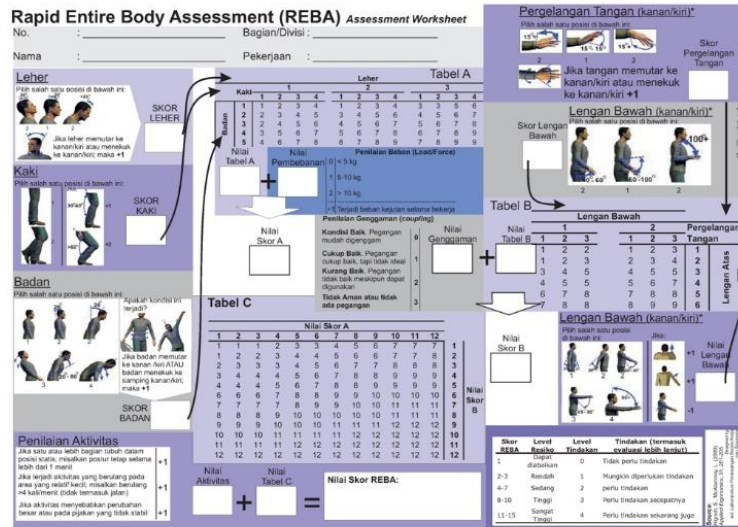
Variabel	Definisi Operasional	Kategori	Alat Ukur	Skala
REBA	Metode yang digunakan untuk menilai postur seorang pekerja secara keseluruhan dengan melihat pergerakan atau postur yang dilakukan oleh pekerja	<ol style="list-style-type: none"> 1. Skor 1 = risiko dapat diabaikan, tidak perlu perbaikan 2. Skor 2 – 3 = risiko rendah, mungkin perlu perbaikan 3. Skor 4 – 7 = risiko sedang, perlu perbaikan 4. Skor 8 – 10 = risiko tinggi, perlu segera perbaikan 5. Skor 11 – 15 = risiko sangat tinggi, perlu saat ini juga tindakan perbaikan 	Lembar Kerja REBA	Ordinal
Punggung (Batang Tubuh)	Bagian belakang tubuh dari leher sampai tulang ekor.	<ol style="list-style-type: none"> 6. Skor 1, jika tegak/alamiah 7. Skor 2, jika 0° – 20° ke depan dan 0°-20° ke belakang 8. Skor 3, jika 20°- 60° ke depan dan >20° ke belakang 9. Skor 4, jika >60° ke depan 10. Skor +1, jika memutar atau miring ke samping 	Lembar penilaian REBA, kamera, dan busur derajat	Ordinal
Leher	Bagian tubuh antara kepala dan toraks.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Skor 1, jika 0°- 20° flexion 2. Skor 2, jika >20° flexion atau extension 3. Skor +1, jika memutar atau miring ke samping 	Lembar penilaian REBA, kamera, dan busur derajat	Ordinal
Kaki	Anggota badan yang menopang tubuh dari pangkal	<ol style="list-style-type: none"> 1. Skor 1, jika kaki tertopang seimbang, bobot tersebar merata. (jalan atau duduk) 2. Skor 2, jika kaki tidak tertopang, bobot tidak tersebar merata/postur tidak stabil, bertumpu pada satu kaki 	Lembar penilaian REBA, kamera, dan	Ordinal

	<p>paha hingga ujung jari kaki.</p>	<p>3. Skor +1, jika lutut antara 30° dan 60° flexion 4. Skor +2, jika lutut >60° flexion (tidak ketika duduk)</p> 	<p>busur derajat</p>	
<p>Lengan atas</p>	<p>Bagian tubuh antara bahu dengan siku.</p>	<p>1. Skor 1, jika 20° extension sampai flexion 2. Skor 2, jika >20° extension dan 20-45° flexion 3. Skor 3, jika >45° - 90° flexion 4. Skor 4, jika >90° flexion 5. Skor +1, jika posisi lengan: abducted, rotated 6. Skor +1, jika bahu ditinggikan 7. Skor -1, jika bersandar, bobot lengan ditopang atau sesuai gravitasi</p> 	<p>Lembar penilaian REBA, kamera, dan busur derajat</p>	<p>Ordinal</p>
<p>Lengan bawah</p>	<p>Bagian tubuh antara siku dengan pergelangan tangan.</p>	<p>1. Skor 1, jika 60° - 100° flexion 2. Skor 2, jika >60° flexion atau >100° flexion</p> 	<p>Lembar penilaian REBA, kamera, dan busur derajat</p>	<p>Ordinal</p>
<p>Pergelangan tangan</p>	<p>Bagian tubuh dari pangkal tangan sampai ujung jari tangan.</p>	<p>1. Skor 1, jika 0° - 15° flexion/extension 2. Skor 2, jika >15° flexion/extension 3. Skor +1, jika pergelangan tangan menyimpang atau berputar</p>	<p>Lembar penilaian REBA, kamera, dan busur derajat</p>	<p>Ordinal</p>

				
Berat beban	Ukuran berat benda, usaha yang dibutuhkan untuk mengangkat, maupun momen inersia benda.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Skor 0, jika <5kg 2. Skor 1, jika 5-10kg 3. Skor 2, jika >10kg 4. Skor +1, jika penambahan beban yang tiba-tiba atau secara cepat 	Lembar penilaian REBA, kamera, dan busur derajat	Ordinal
Coupling	Aktivitas pekerjaan membawa beban berkaitan dengan tekstur, permukaan atau letak	<ol style="list-style-type: none"> 1. Skor 0 = baik, jika pegangan pas dan tepat ditengah, genggamannya kuat 2. Skor 1 = sedang, jika pegangan tangan bisa diterima tapi tidak ideal 3. Skor 2 = kurang baik, jika pegangan tangan tidak bisa diterima walaupun memungkinkan 4. Skor 3 = tidak dapat diterima, jika dipaksakan, genggamannya yang tidak aman, tanpa pegangan Coupling tidak sesuai. 	Lembar penilaian REBA, kamera, dan busur derajat	Ordinal
Aktivitas (Durasi dan Frekuensi)	Tingkat keseringan responden melakukan postur berisiko dalam rentan waktu hitungan menit.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Skor +1, jika 1 atau lebih bagian tubuh statis, ditahan lebih dari 1 menit 2. Skor +1, jika pengulangan gerakan dalam rentan waktu singkat, diulang lebih dari 4 kali per menit (tidak termasuk berjalan) 3. Skor +1, jika gerakan menyebabkan perubahan atau pergeseran postur yang cepat dari postur awal. 	Lembar penilaian REBA, kamera, dan busur derajat	Ordinal

Lembar kerja *REBA* yang dijadikan dasar pengukuran dalam penelitian ini disajikan dalam

Gambar 1.



Gambar 1. Lembar penilaian REBA [7]

Setelah didapatkan skor dari tabel A kemudian dijumlahkan dengan skor untuk berat beban yang diangkat sehingga didapatkan nilai bagian A. Sementara skor dari tabel B dijumlahkan dengan skor dari tabel *coupling* sehingga didapatkan nilai bagian B. Dari nilai bagian A dan B dapat digunakan untuk mencari nilai bagian C yang ada. Nilai REBA didapatkan

dari hasil penjumlahan nilai bagian C dengan nilai aktivitas pekerja. Skor-skor kemudian dijumlah dan hasil akhirnya akan berupa skor *REBA* yang dapat menunjukkan tingkat risiko dan tindakan yang direkomendasikan. Skor *REBA* tersebut akan menentukan *Action Level* yang perlu dilakukan seperti ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. *Action Level* berdasarkan Skor *REBA*

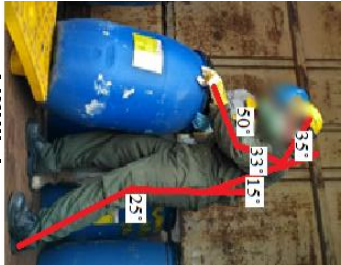
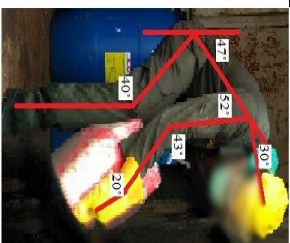
Action Level	Nilai REBA	Level Risiko	Tindakan Perbaikan
0	1	Bisa diabaikan	Tidak perlu
1	2 – 3	Rendah	Mungkin Perlu
2	4 – 7	Sedang	Perlu
3	8 – 10	Tinggi	Perlu segera
4	11 – 15	Sangat Tinggi	Perlu saat ini juga

Berdasarkan perhitungan *REBA* dan level risiko yang didapatkan, dapat diputuskan perlu atau tidaknya tindakan yang dilakukan untuk perbaikan. Perbaikan postur kerja mungkin dilakukan antara lain berupa perancangan ulang peralatan kerja berdasarkan prinsip-prinsip ergonomi.



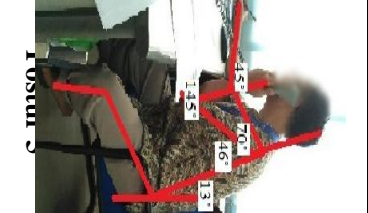
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pekerja yang menjadi obyek penilaian dalam penelitian ini meliputi kegiatan : administrasi pengelolaan limbah radioaktif, pengangkutan limbah B3, preparasi limbah radioaktif padat, identifikasi zat radioaktif terbungkus yang tidak digunakan, preparasi dan analisis sampel limbah radioaktif, pengelolaan bahan bakar nuklir bekas, dan pengolahan limbah radioaktif semi cair.

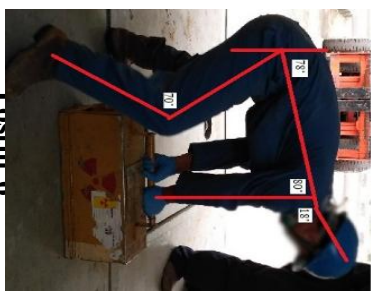
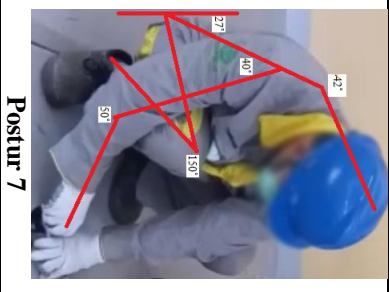
Tabel 3. Hasil Penilaian REBA pada Kegiatan Pengelolaan Limbah Radioaktif

Aktivitas Kegiatan	Leher	Punggung	Kaki	Lengan Atas	Lengan Bawah	Pergelangan Tangan	Beban	Gengaman (<i>Coupling</i>)	Aktivitas	Nilai REBA	Level Risiko
Kegiatan Pengangkutan Limbah B3											
	Fleksi 35° (Skor= 2)	Fleksi 15° (Skor= 2)	Bertumpu pada dua kaki dan membentuk sudut 25° (Skor= 1)	Fleksi 33° (Skor= 2)	Fleksi 50° (Skor= 2)	Tidak membentuk sudut atau 0° (Skor= 1)	5-10kg (Skor= 1)	Baik (Skor= 0)	Pengulangan gerakan (Skor= 1)	5	Sedang
	Fleksi 30° (Skor= 2)	Fleksi 47° (Skor= 3)	Bertumpu pada dua kaki dan membentuk sudut 40° (Skor= 2)	Fleksi 52° (Skor= 3)	Fleksi 43° Skor= 2	Fleksi 20° (Skor= 2)	5-10kg (Skor= 1)	Baik (Skor= 0)	Perubahan postur (Skor= 1)	9	Tinggi

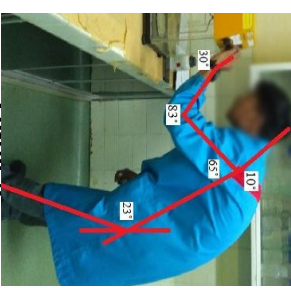
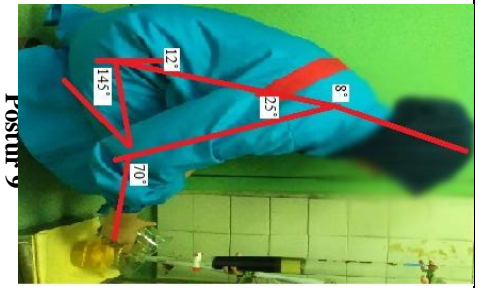
Kegiatan Preparasi Limbah Radioaktif Padat

 <p>Postur 3</p>	<p>Fleksi 15° (Skor= 1)</p>	<p>Fleksi 20° (Skor= 3)</p>	<p>Membentuk sudut 10° (Skor= 1)</p>	<p>Fleksi 33° (Skor= 2)</p>	<p>Fleksi 18 & 35° (Skor= 2)</p>	<p>Tidak membentuk sudut atau 0° (Skor= 1)</p>	<p><5kg (Skor= 0)</p>	<p>Baik (Skor= 0)</p>	<p>Pengulangan gerakan (Skor= 1)</p>	<p>3</p>	<p>Rendah</p>
 <p>Postur 4</p>	<p>Fleksi 42° (Skor= 2)</p>	<p>Fleksi 13° (Skor= 2)</p>	<p>Bertumpu pada dua kaki dan membentuk sudut 145° (Skor= 3)</p>	<p>Fleksi 45° (Skor= 2)</p>	<p>Fleksi 45° (Skor= 2)</p>	<p>Tidak membentuk sudut atau 0° (Skor= 1)</p>	<p><5kg (Skor= 0)</p>	<p>Baik (Skor= 0)</p>	<p>Pengulangan gerakan (Skor= 1)</p>	<p>5</p>	<p>Sedang</p>
<p>Kegiatan Administrasi Pengelolaan Limbah Radioaktif</p>											
 <p>Postur 5</p>	<p>Tidak membentuk sudut atau 0° (Skor= 1)</p>	<p>Fleksi 13° dan miring kesamping (Skor= 3)</p>	<p>Duduk (Skor= 1)</p>	<p>Fleksi 46° dan 70° (Skor= 3)</p>	<p>Fleksi 45° dan 145° (Skor= 2)</p>	<p>Tidak membentuk sudut 0° (Skor= 1)</p>	<p><5kg (Skor= 0)</p>	<p>Baik (Skor= 0)</p>	<p>Bagian tubuh statis (Skor= 1)</p>	<p>4</p>	<p>Sedang</p>

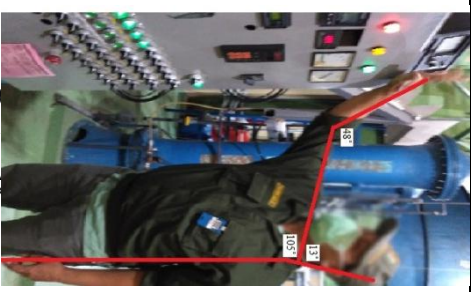

Kegiatan Identifikasi Zat Radioaktif Terbungkus Tidak Digunakan


 <p>Postur 6</p>	<p>Fleksi 18° (Skor= 1)</p>	<p>Fleksi 78° (Skor= 4)</p>	<p>Berjalan dan membentuk sudut 70° (Skor= 3)</p>	<p>Fleksi 80° (Skor= 3)</p>	<p>Tidak membentuk sudut atau 0° (Skor= 2)</p>	<p>Tidak membentuk sudut atau 0° (Skor= 1)</p>	<p>>10 kg (Skor= 2)</p>	<p>Baik (Skor= 0)</p>	<p>Pengulangan gerakan (Skor= 1)</p>	<p>10</p>	<p>Tinggi</p>
 <p>Postur 7</p>	<p>Fleksi 42° (Skor= 2)</p>	<p>Fleksi 27° (Skor= 3)</p>	<p>Bertumpu pada dua kaki dan membentuk sudut 150° (Skor= 3)</p>	<p>Fleksi 40° (Skor= 2)</p>	<p>Fleksi 50° (Skor= 2)</p>	<p>Tidak membentuk sudut atau 0° dan berputar (Skor= 2)</p>	<p><5kg (Skor= 0)</p>	<p>Baik (Skor= 0)</p>	<p>Bagian tubuh statis dan berulang (Skor= 2)</p>	<p>8</p>	<p>Tinggi</p>

Kegiatan Preparasi dan Analisis Limbah Radioaktif

	<p>Fleksi 10° (Skor= 1)</p>	<p>Fleksi 23° (Skor= 3)</p>	<p>Bertumpu pada dua kaki (Skor= 1)</p>	<p>Fleksi 65° (Skor= 3)</p>	<p>Fleksi 83° (Skor= 2)</p>	<p>Fleksi 30° dan berputar (Skor= 3)</p>	<p><5kg (Skor=0)</p>	<p>Baik (Skor= 0)</p>	<p>Bagian tubuh statis (Skor= 1)</p>	<p>5</p>	<p>Sedang</p>
	<p>Fleksi 8° (Skor= 1)</p>	<p>Fleksi 12° (Skor= 2)</p>	<p>Bertumpu pada dua kaki dan membentuk sudut 145° (Skor= 3)</p>	<p>Fleksi 25° (Skor= 2)</p>	<p>Fleksi 70° (Skor= 1)</p>	<p>Tidak membentuk sudut atau 0° (Skor= 1)</p>	<p><5kg (Skor=0)</p>	<p>Baik (Skor= 0)</p>	<p>Pengulangan gerakan (Skor= 1)</p>	<p>4</p>	<p>Sedang</p>

Kegiatan Pengelolaan Bahan Bakar Nuklir Bekas

	<p>Ekstensi 13° (Skor= 1)</p>	<p>Tegak (Skor=1)</p>	<p>Bertumpu pada dua kaki (Skor=1)</p>	<p>Fleksi 135° (Skor=4)</p>	<p>Fleksi 48° (Skor=1)</p>	<p>Tidak membentuk sudut atau 0° (Skor= 1)</p>	<p><5kg (Skor=0)</p>	<p>Baik (Skor= 0)</p>	<p>Bagian tubuh statis (Skor= 1)</p>	<p>3</p>	<p>Rendah</p>
<p>Kegiatan Pengelolaan Limbah Radioaktif Semi Cair</p>											
	<p>Fleksi 3° (Skor= 1)</p>	<p>Fleksi 35° (Skor=3)</p>	<p>Bertumpu pada dua kaki dan membentuk sudut 143° (Skor=3)</p>	<p>Fleksi 40° (Skor=2)</p>	<p>Fleksi 40° (Skor=2)</p>	<p>Tidak membentuk sudut atau 0° (Skor=1)</p>	<p><5kg (Skor=0)</p>	<p>Baik (Skor= 0)</p>	<p>Bagian tubuh statis (Skor= 1)</p>	<p>5</p>	<p>Sedang</p>

	<p>Postur 12</p>	<p>Fleksi 5° (Skor= 1)</p>	<p>Fleksi 65° (Skor= 4)</p>	<p>Bertumpu pada dua kaki dan membentuk sudut 12° (Skor= 1)</p>	<p>Fleksi 32° (Skor= 2)</p>	<p>Fleksi 65° (Skor= 1)</p>	<p>Tidak membentuk sudut derajat atau 0° (Skor= 1)</p>	<p><5kg (Skor= 0)</p>	<p>Baik (Skor= 0)</p>	<p>Bagian tubuh statis (Skor= 1)</p>	<p>3</p>	<p>Rendah</p>
--	------------------	--------------------------------	---------------------------------	---	---------------------------------	---------------------------------	--	------------------------------	---------------------------	--	----------	---------------

Dari 12 (dua belas) postur yang dinilai, terdapat beberapa postur kerja yang memiliki level risiko rendah hingga tinggi. Untuk mengurangi dan mencegah risiko postur kerja tersebut dari kelainan tulang belakang, keseleo, atau yang lainnya, perlu dilakukan usaha pengendalian risiko terhadap postur kerja yang kurang sempurna tersebut. Oleh karena itu ada beberapa hal yang dapat dilakukan sebagai upaya pengendalian risiko dari postur kerja tersebut.

Kegiatan pengendalian risiko ini dilakukan oleh beberapa pekerja saat melakukan aktivitas pekerjaannya dengan postur tertentu, bertujuan untuk mengurangi



Nilai REBA = 10 (Tinggi)



Nilai REBA = 2 (Rendah)

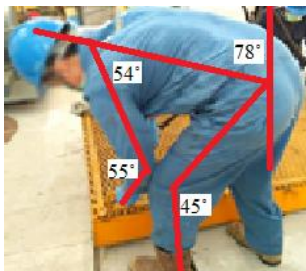
- b. Untuk menghindari posisi membungkuk terlalu lama, sebaiknya bisa diubah dengan menggunakan alat bantu lain untuk diletakkan di bawah material sehingga setidaknya tinggi



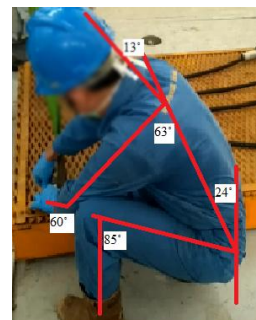
Nilai REBA = 4 (Sedang)



Nilai REBA = 3 (Rendah)



Nilai REBA = 7 (Sedang)



Nilai REBA = 3 (Rendah)

risiko cedera pada tulang belakang. Beberapa usaha pengendalian risiko yang dapat dilakukan sebagai berikut :

1. Pengendalian Teknis (*Engineering control*)

- a. Jika memungkinkan pekerja yang melakukannya dengan mengangkat, menurunkan, menarik, mendorong, dan membawa limbah radioaktif, bisa diminimalisir dengan menyediakan alat bantu seperti *craine*, *forklift*, dan lain sebagainya.

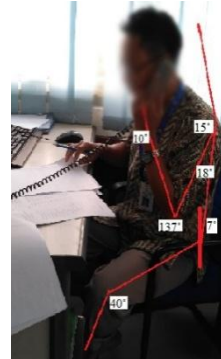
material bisa di sesuaikan dengan tubuh, atau merubah posisi kerjanya. Menurut Silvia (2010), Postur membungkuk dapat mempengaruhi kondisi tulang belakang.

- c. Bekerja dalam posisi duduk statis untuk waktu yang cukup lama, dan posisi punggung yang miring, dan lengan yang menjauhi garis tubuh normal dapat menimbulkan rasa sakit

dan nyeri akibat dihasilkannya asam laktat yang terakumulasi di jaringan otot (Pulat, 1997). Maka dari itu posisi kerja diubah dengan posisi kerja yang lebih tepat.



Nilai REBA = 4 (Sedang)



Nilai REBA = 3 (Rendah)

- d. Untuk posisi kerja jongkok pada saat melepas atau memasang craine dengan posisi punggung membungkuk, lengan menjauhi tubuh, dan leher menunduk maka dapat menyebabkan kelelahan dengan

aktivitas berulang, maka posisi jongkok dapat diubah dengan mengubah posisi kaki, punggung tegap, leher tidak menunduk setidaknya bisa mengurangi risiko.



Nilai REBA = 9 (Tinggi)



Nilai REBA = 7 (Sedang)

2. Pengendalian Administratif (*Administrative control*)



Mengadakan promosi berupa penggunaan poster, spanduk, dan lain-lain dengan berbagai macam informasi mengenai ergonomi, seperti teknik mengangkat yang benar. Mengingat pentingnya kesehatan pekerja bagi perusahaan karena sangat berpengaruh terhadap produktivitas kerja, dan di tempel di lokasi strategis yaitu lokasi yang sering dilalui oleh pekerja ataupun area kerja utama.

KESIMPULAN

Ada beberapa postur kerja dengan nilai *REBA* 8 hingga 10 dalam kegiatan pengelolaan limbah radioaktif di Pusat Teknologi Limbah Radioaktif. Postur-postur kerja tersebut berada pada level risiko tinggi yang perlu segera dilakukan upaya perbaikan untuk menghindarkan pekerja dari cedera ataupun kelainan tulang belakang. Postur kerja tersebut meliputi kegiatan mengangkat beban pada saat pengangkutan limbah B3 dan mengangkat zat radioaktif terbungkus yang tidak digunakan pada kegiatan identifikasi limbah radioaktif. Dengan beban yang di angkat, maka perbaikan postur kerja yang paling efektif dilakukan dengan memanfaatkan alat angkat angkut yang ada. Upaya pengendalian risiko ini dapat mengurangi level risiko kegiatan yang semula ada pada level risiko tinggi menjadi sedang bahkan rendah.

DAFTAR PUSTAKA

1. Budiono, Sugeng, dkk.. *Bunga Rampai Hiperkes dan Keselamatan Kerja : Hygiene Perusahaan, Ergonomik, Kesehatan Kerja dan Keselamatan Kerja (Edisi Kedua)*. Semarang : Badan Penerbit Undip, (2003).
2. Tarwaka, Solichul HA.Bakri, Lilik Sudiajeng.. *Ergonomi Untuk Kesehatan Keselamatan dan Produktivitas*. Edisi I. Cetakan I. Surakarta: UNIBA Press, (2004).
3. Harrianto, Ridwan.. *Buku Ajar Kesehatan Kerja*. Editor: Erita Agustin Hardiyanti. Jakarta: EGC, (2008).
4. Suma'mur, Dr., P.K, M.Sc.. *Higiene Perusahaan Dan Kesehatan Kerja*. Cetakan Ketiga. Jakarta: CV Sagung Seto, (2009).

5. Kumar, Shrawan. PhD, DSc, FergS.. *Biomechanics in Ergonomics*. Taylor & Francis, London, (1999).
6. Andrian, Deni.. *Pengukuran Tingkat Resiko Ergonomi Secara Biomekanika Pada Pekerja Pengangkutan Semen (Studi Kasus, PT Semen Baturaja)*. Laporan Kerja Praktek Fakultas Teknik Universitas Binadarma, Palembang, (2013).
7. Hignett, S and McAtamney, L.. *Applied Ergonomics*, 31, 201-205. Lembar penilaian REBA.. *Laboratorium Perancangan Sistem Kerja dan Ergonomi. Modul 1. Fakultas Teknologi Industri. Universitas Islam Indonesia. 2016/2017.*

KONSEPSI REFERENCE LEVEL NASIONAL UNTUK PAPARAN YANG TELAH ADA

Moekhamad Alfiyan

Bidang Pengkajian Industri dan Penelitian-BAPETEN

Jl. Gajah Mada 8 Jakarta Pusat

Email: m.alfiyan@bapeten.go.id

ABSTRAK

Peraturan pemerintah No. 33 tahun 2007 tentang Keselamatan Radiasi Pengion dan Keamanan Sumber Radioaktif telah mengamankan kepada BAPETEN untuk melakukan intervensi terhadap paparan yang berasal dari NORM (*Naturally Occurring Radioactive Material*). Oleh karena itu diperlukan suatu indikator ataupun nilai acuan/*reference level* sebagai batas perlu tidaknya suatu intervensi. Penyusunan makalah ini untuk memberikan bahan masukan *reference level* nasional dari paparan yang telah ada untuk pengembangan peraturan nasional berhubungan dengan intervensi terhadap paparan yang telah ada, termasuk NORM. *Referencel level* untuk radon dalam ruangan sebesar 300 Bq/m³, tindakan protektif diperlukan untuk pemukiman yang mengandung konsentrasi radon dalam ruangan lebih dari *reference level*. *Reference level* radionuklida dalam bahan bangunan mempertimbangkan nilai batas dosis masyarakat yang besarnya 1 mSv yang implikasinya berupa persyaratan nilai konsentrasi aktivitas radionuklida alam di dalam bahan bangunan dan dilanjutkan dengan penentuan indeks konsentrasi aktivitas. *Reference level* radionuklida dalam bahan pangan juga memperhitungkan nilai batas dosis untuk masyarakat sebesar 1 mSv/tahun. *Reference level* radionuklida dalam air minum dapat menggunakan nilai yang ditetapkan oleh WHO, yaitu 1 Bq/L untuk Gross β dan 0,5 Bq/L untuk gross α . *Reference level* untuk radiasi kosmik yang diterima awak pesawat sebesar 5 mSv/tahun.

Kata Kunci: Reference Level, intervensi, radionuklida

ABSTRACT

Government Regulation No 33 years 2007 on ionizing radiation safety and radioactive sources security has stated that BAPETEN should carry out intervention to exposure from NORM. Intervention will need an indicator or reference level to do it. This paper to give consideration regarding national reference level for existing exposure including NORM (Naturally Occurring Radioactive Material). Radon reference level is 300 Bq/m³, protective action are required to dwelling contain radon concentration more than the reference level Reference level for building material consider public dose limit is 1 mSv/year wich is showed as naturally radioactive concentration in material then index of concentration. Reference level for radionuclides in the food considere public dose limit is 1 mSv/year. Reference level of radionuclides in the drinking water can use WHO requirement with 1 Bq/L for gross β and 0,5 Bq/L for gross α . Reference level for cosmic received by aircrew is 5 mSv.

Key Words: Reference Level, Intervention, Radionuclides

PENDAHULUAN

GSR Part 3 mengelompokkan situasi paparan radiasi menjadi: paparan yang direncanakan (*planned exposure*), paparan darurat (*emergency exposure*) dan paparan yang telah ada (*existing exposure*), yang meliputi: paparan radon dalam ruangan, konsentrasi aktivitas radionuklida dalam barang konsumen, pangan, air minum dan bahan bangunan, paparan dari material yang mengandung radionuklida U dan Th serta K, dan juga paparan sinar kosmik terhadap awak pesawat dan ruang angkasa.

Dalam tatanan peraturan perundang-undangan nasional, yaitu: Peraturan Pemerintah No. 33 tahun 2007 tentang Keselamatan Radiasi Pengion dan Keamanan Sumber Radioaktif, telah disebutkan bahwa BAPETEN berkewajiban melakukan intervensi terhadap paparan yang diakibatkan oleh NORM. Dalam peraturan perundangan nasional, terdapat dua terminologi

NORM dan TENORM. Pengertian dari NORM adalah Zat radioaktif yang secara alami terdapat di alam. Zat radioaktif tersebut berasal dari deret uranium, thorium dan potassium. Sedangkan TENORM (*Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Material*) adalah zat radioaktif alam yang dikarenakan kegiatan manusia atau proses teknologi terjadi peningkatan Paparan Potensial jika dibandingkan dengan keadaan awal.

Intervensi yang merupakan tindakan untuk menghindari paparan radiasi dapat dilakukan melalui tindakan protektif dan remedial. Intervensi akan dipertimbangkan apabila suatu kondisi radiasi telah melampaui nilai tertentu yang diperbolehkan. Oleh karena itu diperlukan suatu indikator ataupun nilai acuan/*reference level* sebagai batas perlu tidaknya suatu intervensi.

Dalam peraturan perundang-undangan nasional, persyaratan nilai batas yang

berhubungan dengan sumber paparan yang telah ada telah diatur oleh beberapa kementerian terkait, termasuk BAPETEN. Misalnya: batas radioaktifitas dalam air minum. Sedangkan parameter-parameter lain belum ditentukan nilai-nilai batasnya.

Makalah ini akan membahas beberapa *reference level* terkait radiasi yang berasal dari paparan *existing* yang dapat dipertimbangkan sebagai nilai batas intervensi yang akan diatur dalam peraturan perundang-undangan.

METODOLOGI

Makalah ini disusun melalui telaahan terhadap pustaka terkait. Pustaka yang digunakan terutama *safety standar* yang diterbitkan oleh IAEA dan peraturan perundangan nasional terkait. Penyusunan makalah juga mempertimbangkan hasil-hasil kajian yang dilakukan oleh BAPETEN pada tahun-tahun sebelumnya [2,3].

PEMBAHASAN

Referece Level Radon

Pengawasan keselamatan radiasi akibat NORM/sumber radiasi alam memerlukan *reference level* yang harus ditetapkan oleh Badan Pengawas, mengingat pengawasan NORM termasuk intervensi terhadapnya menjadi tugas BAPETEN sebagaimana disebutkan dalam Peraturan Pemerintah No. 33 tahun 2007. Nilai *reference level* tersebut akan menjadi indikator kebutuhan intervensi terhadap suatu daerah akibat radiasi alam. Kondisi radiasi alam diatas nilai *reference level* yang ditetapkan akan memerlukan intervensi yang harus dilaksanakan oleh Badan Pengawas sampai pada nilai dibawahnya. Intervensi dapat bersifat tindakan protektif atau remedial, bergantung pada permasalahan radiasi alam yang terjadi. Untuk daerah yang anomali tingkat radiasi alamnya diakibatkan oleh karakteristik geologi setempat dengan radius cukup besar, maka tindakan protektif lebih rasional untuk dipilih.

Mengingat implikasi intervensi dari suatu nilai *reference level* yang ditetapkan, maka dalam menetapkan nilai *reference level*, badan pengawasan harus mempertimbangkan faktor sosial ekonomi, terutama populasi yang akan terkena intervensi. Langkah awal dalam membuat nilai *reference level* adalah melaksanakan survei radon nasional, berdasarkan hasil survei radon nasional tersebut akan diketahui distribusi konsentrasi radon di seluruh wilayah, termasuk radon prone area.

BSS telah menetapkan nilai *reference level* konsentrasi radon dalam ruangan sebesar 300 Bq/m³. Nilai tersebut dapat bukanlah nilai batas mutlak yang harus dipenuhi oleh negara

anggota. ICRP menetapkan nilai batas konsentrasi radon dalam ruangan sebesar 600 Bq/m³ sebelum direvisi pada tahun 2007. Dalam dokumen IAEA, SSG-32 tentang proteksi publik akibat paparan radiasi dalam ruangan akibat NORM melakukan pendekatan *graded approach* dengan mengkategorikan intervensi menjadi bersifat voluntary dan mandatory. Invervensi bersifat voluntary jika konsentrasi radon dalam ruangan pada nilai kurang dari atau sama dengan 3000 Bq/m³ atau setara dengan dosis 100 mSv dan intervensi bersifat mandatory/wajib jika konsentrasi radon melampaui 3000 Bq/m³. Namun demikian, untuk menetapkan nilai *referencel level* diatas 300 Bq/m³, badan pengawas harus dapat memberikan alasan/justifikasi ilmiah terhadap keputusan tersebut, karena sampai saat ini, nilai 300 Bq/m³ merupakan nilai yang telah menjadi kesepakatan internasional. Sedangkan nilai batas sampai 3000 Bq/m³ yang dirumuskan IAEA dapat membantu badan pengawas dalam mempertimbangkan keputusan intervensi terhadap radon prone area selain mempertimbangkan faktor sosial ekonomi.

Praktek nilai *reference level* 300 Bq/m³ untuk kondisi kabupaten Mamuju, mungkin berdampak pada luasnya kawasan yang memerlukan intervensi. Berdasarkan hasil kajian BAPETEN, ditemukan beberapa pemukiman di Desa Botteng yang termasuk kelompok radon prone area (daerah dengan konsentrasi di dalam pemukiman penduduk melampaui 300 Bq/m³. Untuk mengatasi hal tersebut, tindakan protektif terhadap paparan radon perlu direkomendasikan kepada masyarakat. Tindakan protektif melalui peningkatan fungsi ventilasi dan mempertahankan rumah tradisional berupa rumah panggung.

Reference level Radionuklida dalam Bahan Bangunan

Reference level radionuklida dalam bahan bangunan harus mempertimbangkan nilai batas dosis masyarakat yang besarnya kurang dari atau sama dengan 1 mSv. Implikasinya berupa persyaratan nilai konsentrasi aktivitas radionuklida alam di dalam bahan bangunan dan dilanjutkan dengan penentuan indeks konsentrasi aktivitas. Indeks konsentrasi aktivitas berhubungan dengan dosis radiasi gamma di bangunan yang dibangun dari bahan bangunan tertentu. Indeks konsentrasi aktivitas merupakan alat *screening* untuk mengidentifikasi bahan bangunan yang membutuhkan pembatasan. Indeks konsentrasi aktivitas dirumuskan di bawah:

$$I = \frac{C_{Ra}}{300 \text{ Bq/kg}} + \frac{C_{Th}}{200 \text{ Bq/kg}} + \frac{C_K}{3000 \text{ Bq/kg}}$$

Di mana :

C_{Ra} adalah konsentrasi aktivitas ^{226}Ra di dalam bahan bangunan dalam satuan Bq/kg

C_{Th} adalah konsentrasi aktivitas ^{232}Th di dalam bahan bangunan dalam satuan Bq/kg

C_K adalah konsentrasi aktivitas ^{40}K di dalam bahan bangunan dalam satuan Bq/kg

Jika indeks konsentrasi I kurang dari 1 untuk ukuran *bulk*, seperti beton dan bata, atau I kurang dari 6 untuk bahan *superficial* seperti ubin, dosis efektif tahunan akibat paparan radiasi gamma dari bahan bangunan kurang dari tingkat panduan 1 mSv. Bahan bangunan seperti itu tidak harus tergantung dari pembatasan penggunaan. Untuk bahan bangunan yang memerlukan penelaahan lebih lanjut, maka harus dilakukan perhitungan dosis menggunakan model ruangan yang menunjukkan ruangan tertentu yang dibangun dari bahan bangunan tertentu. Model ruangan juga memungkinkan adanya paparan eksternal *background outdoor* karena radionuklida yang berasal dari alam dalam tanah yang tidak terganggu. Dosis efektif hasil perhitungan harus dibandingkan dengan tingkat panduan. Jika dosis efektif terhitung kurang dari tingkat panduan 1 mSv, bahan bangunan tidak perlu dibatasi penggunaannya. Jika dosis efektif hasil perhitungan melebihi nilai tingkat panduan 1 mSv, maka harus ditentukan langkah-langkah yang mungkin saja memerlukan dana untuk pembatasan penggunaan bahan bangunan tersebut. Penting untuk diketahui bahwa residu/sisa dari industri yang melibatkan NORM, seperti abu terbang dan fosfogypsum, kadang digunakan dalam pembuatan berbagai macam bahan bangunan. Abu terbang dan fosfogypsum yang dihasilkan oleh industri NORM diatas merupakan fenomena TENORM yang mungkin memerlukan pengawasan. Indeks aktivitas, atau metode penilaian dosis alternatif harus diterapkan sampai bahan bangunan siap pakai; ini tidak ditujukan untuk diterapkan dalam komponen penyusunan bahan bangunan. Jika residu mengandung radionuklida lain selain ^{226}Ra , ^{232}Th dan ^{40}K , maka harus dilakukan penilaian terhadap paparan akibat radionuklida ini. Jika ^{232}Th dan ^{226}Ra tidak dalam keadaan setimbang di dalam residu, maka konsentrasi ^{228}Ra harus digunakan untuk menggantikan konsentrasi ^{232}Th .

Reference level Radionuklida dalam Bahan Pangan

Penentuan *reference level* radionuklida dalam bahan pangan mempertimbangkan dosis efektif yang diterima orang representatif tidak lebih dari 1 mSv/tahun. Selain itu juga dapat mempertimbangkan tingkat panduan kandungan

radionuklida dalam bahan pangan yang diperdagangkan secara internasional yang dapat mengandung zat radioaktif akibat kedaruratan nuklir atau radiologik sebagaimana dipublikasikan oleh FAO/WHO Codex Alimentarius Commission yang ditetapkan:

- Berdasarkan kriteria dosis 1 mSv/tahun
- Mengasumsikan fraksi dari bahan pangan yang diimpor oleh negara adalah 0,1.
- Dosis akibat radionuklida alam tidak dimaksudkan untuk pengendalian (puluhan sampai ratusan mikrosievert/tahun).

Reference Level Radionuklida dalam Air Minum

Pemenuhan terhadap nilai baku tingkat Gross α dan Gross β dalam Perka BAPETEN No. 2 tahun 1999 (berdasarkan 10 % baku tingkat lingkungan untuk radionuklida yang tidak diketahui= 0,04 Bq/l) tidak dapat dipenuhi oleh sebagian besar air minum dalam kemasan, terutama untuk parameter Gross β . Namun jika dibandingkan dengan nilai yang ditetapkan oleh WHO, yaitu 1 Bq/L untuk Gross β dan 0,5 Bq/L untuk Gross α , nilai konsentrasi aktivitas Gross α dan Gross β yang terkandung dalam air minum dalam kemasan masih dibawah nilai tersebut. Fenomena tersebut menjadikan pentingnya mengamendemen nilai baku tingkat air minum sedemikian rupa sehingga dapat dioperasionalkan namun tetap proporsional dengan tingkat resiko kesehatan yang diizinkan.

Reference Level untuk awak pesawat

Perhatian terhadap dosis radiasi kosmik yang diterima oleh awak pesawat (pilot dan pramugari) masih sangat kurang. ICRP pada tahun 1990 telah mengidentifikasi awak pesawat sebagai kelompok pekerja yang terkena paparan. Dosis yang diterima pilot dan pramugari sering lebih besar dari dosis yang diterima pekerja radiasi.

The Federal Aviation Administration (FAA) memperhatikan resiko radiasi akibat kosmik terhadap awak pesawat pada tahun 1990 dengan menerbitkan Advisory Circular 120-52, "Radiation Exposure of Air Carrier Crewmembers. Menurut laporan tersebut, dosis rata-rata dari radiasi kosmik dan terrestrial adalah 0,06 μ Sv/jam. Di ketinggian dari 35.000 kaki, yang merupakan ketinggian yang umum untuk penerbangan domestic, laju dosis dari sinar kosmik adalah 6 μ Sv/jam.

IAEA dalam SSG-32 mempertimbangkan nilai *reference level* untuk dosis yang diterima awak pesawat akibat kosmik sebesar 5 mSv. Penerbangan komersial akan bergantung ketinggian, lintang dan waktu dalam siklus matahari. Untuk penerbangan jarak jauh,

laju dosis diperkirakan 4 $\mu\text{Sv}/\text{jam}$ dan penerbangan jarak dekat 3 $\mu\text{Sv}/\text{jam}$. Dengan estimasi dosis tersebut, maka dapat diperkirakan lama penerbangan yang diizinkan kepada awak pesawat sedemikian rupa sehingga nilai *reference level* 5 mSv tidak terlampaui.

KESIMPULAN

Reference level nasional terhadap sumber radiasi yang termasuk dalam paparan yang telah ada diperlukan sebagai dasar pengendalian dan indikator kebutuhan intervensi.

1. *Reference level* radon dalam ruangan dinyatakan sebesar 300 Bq/m³ sebagaimana rekomendasi IAEA. Untuk kondisi radon dalam ruangan melampaui nilai diatas maka disarankan tindakan protektif untuk menurunkannya.
2. *Referencel level* radionuklida dalam bahan pangan dan bahan bangunan ditetapkan dengan mempertimbangan besar dosis efektif yang diterima orang representatif tidak lebih dari 1 mSv/tahun. Pemenuhan persyaratan tersebut diimplikasikan dengan nilai batas konsentrasi radionuklida yang dipersyaratkan pada bahan pangan dan bahan bangunan.
3. *Reference level* radionuklida dalam air minum diusulkan mengikuti WHO, yaitu 1 Bq/L untuk Gross β dan 0,5 Bq/L untuk Gross α , nilai konsentrasi aktivitas Gross α dan Gross β yang terkandung dalam air minum dalam kemasan di Indonesia masih dibawah nilai tersebut.
4. *Referencel level* untuk awak penerbangan sebesar 5 mSv/tahun dapat dicapai dengan melakukan penatalaksanaan tugas personil oleh manajemen.

DAFTAR PUSTAKA

1. Peraturan Pemerintah No. 33 tahun 2007 tentang Keselamatan Radiasi dan Keamanan Sumber Radioaktif.
2. P2STPFRZR, Laporan Hasil Kajian Pengkajian Baku Tingkat Radioaktivitas Untuk Pengawasan Air Minum, Bahan Bangunan Dan Optimisasi Paparan Publik Dari Lepasn Fasilitas Nuklir, Jakarta, (2008).
3. P2STPFRZR, Laporan Hasil Kajian NORM dan Potensi TENOEM di Kabupaten Mamuju, , Jakarta, (2013)
4. IAEA, , *GSR Part 3, Safety Requirements: Radiation Protection and Safety of radiation Sources: International Basic Safety Standards*, Vienna, (2011)
5. IAEA. *SSG-32 Protection of the Public against Exposure Indoors due to Radon and Other Natural Sources of Radiation*, Vienna, (2015).

KAJIAN PROSES DAUR ULANG ZAT RADIOAKTIF TERBUNGKUS COBALT-60 'YANG SUDAH TIDAK DIGUNAKAN' UNTUK LOGGING MINYAK DAN BATUBARA

Susilo Widodo¹, Suhaedi Muhammad², Rr.Djarwanti,RPS³

¹Pusat Sains dan Teknologi Akselerator, Jl. Babarsari, Kotak Pos 6101 ykbb, Yogyakarta

²Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi, Gedung B, Kawasan Nuklir Pasar Jumat

³Pusat Teknologi Radioisotop dan Radiofarmaka, Gedung 11, Kawasan Nuklir Serpong

Email : swidodo@batan.go.id

ABSTRAK

KAJIAN PROSES DAUR ULANG ZAT RADIOAKTIF TERBUNGKUS COBALT-60 'YANG SUDAH TIDAK DIGUNAKAN' UNTUK LOGGING MINYAK DAN BATUBARA. Dalam kurun waktu dua puluh tahun terakhir kebutuhan zat radioaktif terbungkus ⁶⁰Co untuk keperluan logging minyak dan batubara masih cukup banyak. Mahalnya harga produk impor zat radioaktif terbungkus ⁶⁰Co menjadi salah satu kendala bagi para pengguna. Penerbitan Peraturan Pemerintah No. 61 Tahun 2013 tentang Pengelolaan Limbah Radioaktif membuka peluang secara legal bagi BATAN untuk mendaur ulang zat radioaktif terbungkus yang sudah tidak digunakan yang berasal dari para penghasil limbah. Tulisan ini melaporkan hasil kajian terhadap tahapan yang dilakukan dalam proses daur ulang zat radioaktif terbungkus ⁶⁰Co untuk penggunaan di bidang logging minyak dan batubara. Kajian keselamatan merupakan langkah yang harus dilakukan terlebih dahulu guna mengetahui sejauh mana tingkat kelayakan dan keselamatannya selama proses daur ulang selanjutnya. Proses daur ulang harus dilakukan di laboratorium yang memiliki fasilitas yang memadai. Adapun tahapan proses daur ulang selengkapnya meliputi pengeluaran *outer capsule* dari pembungkus luar, pengeluaran *inner capsule* dari dalam *outer capsule*, pengeluaran granul zat radioaktif ⁶⁰Co dari dalam *inner capsule*, pemasukan granul zat radioaktif ⁶⁰Co ke dalam *inner capsule* yang baru, pengujian awal *inner capsule* yang berisi granul zat radioaktif ⁶⁰Co, standardisasi aktivitas *inner capsule* yang berisi granul zat radioaktif ⁶⁰Co, pengujian zat radioaktif terbungkus ⁶⁰Co sebagai bentuk khusus dan penerbitan sertifikat zat radioaktif bentuk khusus. Hasil kajian menunjukkan bahwa produk daur ulang zat radioaktif terbungkus ⁶⁰Co terjamin keselamatannya untuk digunakan karena sudah melalui tahap standardisasi, pengujian dan sertifikasi oleh institusi yang kompeten.

Kata kunci : daur ulang, zat radioaktif, ⁶⁰Co, sumber terbungkus,

ABSTRACT

ASSESSMENT OF RECYCLE PROCESS OF UNUSED COBALT-60 SEALED RADIOACTIVE SUBSTANCE FOR OIL AND COAL LOGGING. In the last twenty years the need of sealed radioactive substance of ⁶⁰Co for oil and coal logging are still quite a lot. The high cost for imported products of the sealed radioactive substance of ⁶⁰Co becomes one of obstacles to users. The issuance of Government Regulation No. 61 Year 2013 on Radioactive Waste Management opens legal opportunity for BATAN to recycle the unused radiactive substancess originating from waste-producers. This paper reports the results of an assessment on the steps undertaken in the recycle process of sealed ⁶⁰Co radioactive substance for use in the oil and coal logging fields. Safety assessment is a step that have to be undertaken first in order to know the extent of its feasibility and safety during subsequent recycle process. The recycle process should be done in a laboratory that has adequate facilities. The complete recycle process includes removing outer capsule from the outer seal, removing the inner capsule from the outer capsule, removing the ⁶⁰Co radioactive granule from inside the inner capsule, inserting the ⁶⁰Co radioactive granule into a new inner capsule, initial testing of the new inner capsule containing granules of radioactive substance of ⁶⁰Co, standardization of inner capsule activity containing granules of radioactive substance of ⁶⁰Co, testing of the new ⁶⁰Co sealed source as a special shape and issuing certificate for the special spape of the sealed radioactive substance. The results of the assessment shows that the recycled product of the sealed ⁶⁰Co radioactive substance is safe to be used asit has passed the steps of standardization, testing and certification by the competent institutions.

Keywords: recycle, radioactive substance, ⁶⁰Co, sealed source

PENDAHULUAN

Di dalam Peraturan Pemerintah Nomor 61 Tahun 2013 tentang Pengelolaan Limbah Radioaktif disebutkan bahwa BATAN selaku badan pelaksana wajib melakukan pengumpulan dan pengelompokan zat radioaktif terbungkus 'yang tidak digunakan' yang diterima dari

penghasil limbah radioaktif. Selama pengumpulan dan pengelompokan tersebut BATAN dapat melakukan kajian sesuai dengan standar, pedoman, persyaratan dan/atau prosedur yang ditetapkan oleh Kepala BATAN dengan tujuan untuk menentukan apakah zat radioaktif terbungkus tersebut dapat digunakan sebagai zat radioaktif terbungkus yang dapat digunakan

kembali, zat radioaktif terbungkus yang dapat didaur ulang atau sebagai limbah radioaktif [1].

Apabila laporan hasil kajian menentukan sebagai zat radioaktif terbungkus yang dapat di daur ulang, maka Kepala BATAN menerbitkan sertifikat yang menyatakan bahwa zat radioaktif terbungkus tersebut telah diuji atau distandardisasi untuk dapat dimanfaatkan kembali. Yang dimaksud dengan daur ulang di sini adalah proses yang dilakukan terhadap zat radioaktif terbungkus yang tidak digunakan dengan tujuan untuk menghasilkan zat radioaktif terbungkus yang baru yang bisa digunakan kembali [1].

Zat radioaktif terbungkus ^{60}Co (cobalt-60) 'yang sudah tidak digunakan' merupakan salah satu jenis zat radioaktif yang berpotensi untuk diproses daur ulang menjadi sumber radioaktif terbungkus yang dapat digunakan kembali untuk berbagai pemanfaatan, antara lain penggunaan di bidang *logging* minyak dan *logging* batu bara sepanjang tingkat aktivitasnya masih cukup memadai untuk keperluan tersebut. Pada umumnya kebutuhan tingkat aktivitas untuk keperluan *logging* adalah sekitar 25 mCi sampai dengan 200 mCi. Pemanfaatan kembali ini sangat memungkinkan karena pada umumnya tingkat aktivitas ^{60}Co untuk penggunaan di bidang lain, misal untuk radiografi industri, lebih tinggi daripada untuk keperluan *logging*. Dengan demikian sumber ^{60}Co radiografi industri yang akan dilimahkan masih dapat digunakan untuk *logging*. Karakteristik penting ^{60}Co adalah merupakan zat radioaktif dengan bagan peluruhan sederhana dan pemancar gamma dengan energi yang cukup tinggi, total sebesar 2504 keV untuk setiap peluruhan [2] dan mempunyai konstanta laju paparan sebesar 12.9 R-cm²/jam-mCi [3] sehingga sangat layak digunakan untuk keperluan radiografi industri sebagaimana ^{192}Ir yang memancarkan sinar gamma dengan total sebesar 816,5 keV [2] dan konstanta laju paparan sebesar 4,6 R-cm²/jam-mCi [3]. Selain itu ^{60}Co juga lazim digunakan untuk keperluan *logging* di samping zat radioaktif ^{137}Cs , ^{133}Ba dan ^{241}Am dan zat radioaktif pemancar neutron.

Untuk situasi tertentu proses daur ulang ^{60}Co cukup mendesak ketika kebutuhan layanan *logging* cukup besar sebagaimana yang terjadi di Arab Saudi [4]. Kelayakan dari aspek proses perizinan dan ekonomi daur ulang ^{60}Co dapat diuraikan sebagai berikut. Dalam kurun waktu dua puluh tahun terakhir kebutuhan produk zat radioaktif terbungkus ^{60}Co untuk kegiatan *logging* minyak dan batu bara semakin meningkat. Berdasarkan informasi langsung dari para penyedia peralatan untuk kegiatan *logging* seperti PT. Rajawali Permata Sakti, PT. Tracerco

dan PT. Dialog Sistemindo, harga sumber ^{60}Co hasil produk daur ulang hanya sekitar sepertiga dari harga produk yang sama yang diimpor dari luar negeri. Harga ini sangat menguntungkan bagi para pengguna produk tersebut. Dari aspek perizinanpun pihak pengguna sangat dimudahkan bila dibandingkan dengan membeli melalui impor.

Untuk melakukan daur ulang zat radioaktif terbungkus ^{60}Co 'yang sudah tidak digunakan' dengan tujuan untuk kegiatan *logging* minyak dan batu bara, terlebih dahulu harus dilakukan kajian keselamatan terhadap bungkusan tersebut untuk menjamin keselamatan dalam pelaksanaan tahap daur ulang berikutnya. Dari hasil kajian keselamatan tersebut kemudian dapat dilakukan tahapan proses daur ulang lebih lanjut di laboratorium yang memiliki fasilitas yang memadai untuk keperluan proteksi radiasi bagi pekerjanya. Tahapan proses daur ulang ^{60}Co yang paling sederhana adalah pemindahan zat radioaktif dari wadah lama ke wadah baru. Tahapan tersebut meliputi berturut-turut pengeluaran *outer capsule* yang berisi sumber terbungkus ^{60}Co dari pembungkus luar, pengeluaran *inner capsule* yang di dalamnya berisi granul zat radioaktif ^{60}Co dari dalam *outer capsule*, pengeluaran granul zat radioaktif ^{60}Co dari dalam *inner capsule*, pemasukan granul zat radioaktif ^{60}Co ke dalam *inner capsule* yang baru, pengukuran aktivitas *inner capsule* baru yang berisi granul zat radioaktif ^{60}Co , penutupan dan pengelasan *inner capsule* baru, pengujian awal *inner capsule* baru yang berisi granul zat radioaktif ^{60}Co , standarisasi sumber terbungkus ^{60}Co hasil daur ulang, pengujian sumber terbungkus ^{60}Co hasil daur ulang sebagai zat radioaktif bentuk khusus dan penerbitan sertifikat sumber terbungkus ^{60}Co hasil daur ulang.

METODOLOGI

Metodologi dalam rangka kajian proses daur ulang zat radioaktif terbungkus ^{60}Co yang akan digunakan untuk kegiatan *logging* minyak dan *logging* batubara adalah dengan mengkaji dan memcermati tahapan-tahapan proses, dalam hal ini proses pengeluaran dari wadah lama dan pemindahan ke wadah yang baru disertai dengan pengujian, distandardisasi dan sertifikasinya. Adapun lingkup kajian pada proses daur ulang ini selengkapnya adalah sebagai berikut [5,6,7,8,9]:

1. Kajian terhadap proses kajian keselamatan terhadap bungkusan yang berisi zat radioaktif terbungkus ^{60}Co yang sudah tidak digunakan yang akan di daur ulang,

2. Kajian proses pengeluaran *outer capsule* yang berisi dari *inner capsule* dari pembungkus luar (*transport container*),
3. Kajian proses pengeluaran *inner capsule* yang berisi granul zat radioaktif ^{60}Co dari *outer capsule*,
4. Kajian proses pengeluaran granul zat radioaktif ^{60}Co dari *inner capsule*,
5. Kajian proses pemasukan granul zat radioaktif Co-60 ke dalam *inner capsule* yang baru,
6. Kajian proses pengukuran aktivitas *inner capsule* yang berisi ^{60}Co ,
7. Kajian proses standarisasi aktivitas ^{60}Co ,
8. Kajian proses pengujian zat radioaktif terbungkus ^{60}Co hasil daur ulang sebagai zat radioaktif bentuk khusus, dan
9. Kajian proses sertifikasi zat radioaktif bentuk khusus untuk produk zat radioaktif terbungkus ^{60}Co hasil daur ulang.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kajian terhadap proses kajian keselamatan bungkusan

Berdasarkan Peraturan Kepala BATAN Nomor 7 Tahun 2017 tentang Penggunaan Kembali (*reuse*) dan Daur Ulang (*recycle*) Zat Radioaktif Terbungkus Yang Tidak Digunakan [10], kajian keselamatan terhadap bungkusan yang berisi zat radioaktif terbungkus ^{60}Co yang akan didaur ulang harus dilakukan terlebih dahulu untuk menjamin keselamatan pelaksanaan proses daur ulang. Inisiasi kajian keselamatan berasal dari Pusat Teknologi Limbah Radioaktif (PTLR)–BATAN sebagai institusi pengelola limbah radioaktif untuk meminta Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi (PTKMR)–BATAN, sebagai institusi yang mempunyai kewenangan dan kompetensi, untuk melakukan pengkajian aspek keselamatan tersebut. Kajian keselamatan yang dilakukan oleh PTKMR minimal meliputi pemeriksaan kondisi fisik bungkusan, jenis zat radioaktif, aktivitas zat radioaktif, sifat fisika dan kimia zat radioaktif serta kemungkinan tingkat kesulitan proses daur ulang. Hasil kajian keselamatan ini disampaikan ke PTLR sebagai pihak pemohon dalam bentuk rekomendasi. Dari aspek kompetensi, PTKMR sebagai pihak yang melakukan kajian keselamatan adalah Pusat yang memiliki sejumlah fasilitas laboratorium pengujian yang telah terakreditasi oleh KAN berbasis ISO 17015-2008. Dengan demikian, selain independensi dan terhindarnya konflik kepentingan, mutu kajian dan pengujian juga dapat dipertanggungjawabkan.

Kajian Proses Pengeluaran *Outer Capsule* Dari Pembungkus Luar

Pada umumnya proses daur ulang dilakukan dengan memasukkan pembungkus luar zat radioaktif terbungkus ^{60}Co ke dalam suatu *hot cell* (*transfer cell*) yang mempunyai penahan radiasi dengan ketebalan tertentu sehingga paparan radiasi di luar *hot cell* tidak terpengaruh oleh zat radioaktif yang ada di dalam *hot cell*. *Outer capsule* yang berisi *inner capsule* dikeluarkan dari pembungkus luar dengan menggunakan *master slave manipulator* kemudian disimpan di meja *hot cell* yang sudah dilapisi dengan lembaran plastik untuk mencegah kontaminasi. Ukuran *outer capsule* pada umumnya berdiameter sekitar 3 cm dan tinggi sekitar 10 cm. Karena kegiatan pengeluaran *outer capsule* ini dilakukan di dalam *hot cell* maka kenaikan paparan radiasi di dalam *hot cell* tidak banyak berpengaruh terhadap keselamatan pekerja yang berada di luar *hot cell*.

Kajian proses pengeluaran *inner capsule* dari *outer capsule*

Proses pengeluaran *inner capsule* yang pada umumnya berukuran diameter 1,5 cm dan tinggi 6 cm dari dalam *outer capsule* dilakukan dengan cara menjepit *outer capsule* dengan ragum, kemudian membuka tutup *outer capsule* dengan menggunakan kunci L dan *master slave manipulator*, kemudian *inner capsule* dikeluarkan dan disimpan di dalam suatu tabung gelas. Tahapan kegiatan ini tetap dilakukan di dalam *hot cell*, sehingga kenaikan paparan radiasi yang cukup tinggi tidak mempengaruhi keselamatan pekerjaannya.

Kajian proses pengeluaran granul zat radioaktif ^{60}Co dari dalam *inner capsule*

Zat radioaktif ^{60}Co yang ada di dalam *inner capsule* pada umumnya berbentuk granul dengan diameter 2 mm. Untuk mengeluarkan granul zat radioaktif ^{60}Co , terlebih dahulu *inner capsule* dijepit dengan menggunakan ragum, kemudian dengan menggunakan kunci L dan *master slave manipulator* tutup *inner capsule* dibuka. *Inner capsule* yang sudah terbuka dilepas dari jepitan ragum, isi granul zat radioaktif ^{60}Co yang ada di dalamnya dituangkan ke dalam cawan gelas yang berdiameter 10 cm. Selanjutnya tiap-tiap butiran granul zat radioaktif ^{60}Co diukur aktivitasnya dengan menggunakan *Dose Calibrator*. Karena kegiatan pengeluaran granul zat radioaktif ^{60}Co dari dalam *inner capsule* dilakukan di dalam *hot cell*, meski paparan radiasi sangat tinggi namun keselamatan pekerja tetap terjamin, sedangkan pengukuran aktivitas granul dengan *Dose Calibrator* di luar *hot cell* dilakukan butir demi

butir sehingga paparan radiasinya masih di bawah batas keselamatan.

Kajian proses pemasukan granul zat radioaktif ^{60}Co ke dalam *inner capsule* yang baru

Untuk keperluan pewadahan granul zat radioaktif ^{60}Co yang akan digunakan untuk kegiatan logging minyak atau logging batubara pada umumnya digunakan *inner capsule* yang terbuat dari bahan *stainless steel* serie 304 dengan diameter 6 mm, tinggi 8 mm dan tebal 1 mm. Jumlah granul zat radioaktif ^{60}Co yang akan dimasukkan ke dalam *inner capsule* sesuai dengan besarnya aktivitas yang dibutuhkan. Adapun variasi aktivitas ^{60}Co yang digunakan untuk logging minyak atau batu bara pada umumnya berkisar antara 25 mCi, 50 mCi, 100 mCi, 150 mCi dan 200 mCi.

Di dalam *hot cell*, dengan menggunakan pinset dan *master slave manipulator*, butiran granul zat radioaktif ^{60}Co dimasukkan ke dalam *inner capsule* yang baru. Kumpulan granul zat radioaktif ^{60}Co yang sudah dimasukkan ke dalam *inner capsule* selanjutnya diukur aktivitasnya dengan menggunakan *dose callibrator*. Bila aktivitas yang terukur telah sesuai dengan yang dibutuhkan dengan toleransi perbedaan total aktivitas kurang dari 2 mCi selanjutnya *inner capsule* ditutup dengan penutup dan dilas secara atomik dengan metode TIG.

Inner capsule yang telah ditutup dengan metode pengelasan selanjutnya didekontaminasi (dibersihkan dari pengotor radioaktif) dengan air dan alkohol serta dilakukan tes usap menggunakan kertas saring. Kertas saring tersebut kemudian diukur aktivitasnya. *Inner capsule* akan dinyatakan bebas kontaminasi apabila hasil pengukuran kertas saring di bawah nilai 150 dpm (setara dengan 5 nCi) [5,6,7,8,9]. Tahapan ini adalah tahapan yang cukup menentukan terhadap kualitas dan aktivitas sumber ^{60}Co hasil daur ulang.

Kajian proses pengujian tahap awal *inner capsule* yang berisi granul zat radioaktif ^{60}Co

Di dalam *hot cell*, *inner capsule* yang berisi granul zat radioaktif ^{60}Co dipindahkan ke atas meja yang dapat berputar secara manual. Kamera monitor yang mempunyai perbesaran sekitar 50 kali diarahkan ke *inner capsule*. Hasil pengelasan diamati secara visual pada layar monitor. Pemeriksaan berikutnya adalah tes kebocoran dengan menggunakan metode gelembung udara sebagaimana yang dilakukan di Jerman [11]. *Inner capsule* yang telah lolos uji dipindahkan ke dalam suatu wadah gelas yang berisi larutan isopropanol. Wadah dihubungkan dengan sistem vacuum, kemudian divakum dengan kondisi 15

inci Hg selama 10 detik dan diamati gelembung yang keluar dari kapsul. Tekanan vakum dinaikkan sampai 20 inci Hg selama 10 detik dan diamati seperti pengamatan sebelumnya. Jika ada kebocoran maka kecepatan pembentukan gelembung udara akan terlihat lebih cepat dibandingkan dengan gelembung udara normal yang ada di sekeliling kapsul.

Hasil kajian menunjukkan bahwa tahapan ini memerlukan kualifikasi pekerja yang sangat kompeten dan berpengalaman dalam melakukan pemeriksaan secara visual. Hasil pemeriksaan visual akan sangat berpengaruh terhadap kualitas produk daur ulang.

Kajian proses pengukuran aktivitas dan standarisasi zat radioaktif terbungkus ^{60}Co hasil daur ulang.

Untuk keperluan pengukuran aktivitas secara akurat dan standarisasi, *inner capsule* yang berisi granul zat radioaktif ^{60}Co yang telah lolos uji tahap awal dikirim ke laboratorium standarisasi yang terakreditasi antara lain Lab standarisasi PTKMR-BATAN. Permohonan standarisasi produk zat radioaktif terbungkus ^{60}Co hasil daur ulang ke laboratorium standarisasi disampaikan dengan melampirkan [9] :

1. Gambar teknis *inner capsule* yang berisi granul zat radioaktif ^{60}Co hasil daur ulang,
2. Gambar teknis wadah tempat *inner capsule* yang berisi granul zat radioaktif ^{60}Co hasil daur ulang,
3. Sertifikat bebas kontaminasi untuk bungkusan yang berisi granul zat radioaktif ^{60}Co hasil proses daur ulang,
4. Dokumen "To Whom It May Concern" untuk bungkusan yang berisi granul zat radioaktif ^{60}Co hasil proses daur ulang,
5. Persetujuan pengiriman zat radioaktif dari BAPETEN.

Pengukuran aktivitas *inner capsule* yang berisi granul zat radioaktif ^{60}Co dilakukan dengan menggunakan *dose callibrator* yang telah dikalibrasi dengan sumber standar yang tertelusur ke sistem satuan internasional. Laboratorium standarisasi akan mengeluarkan hasil pengukuran berupa sertifikat hasil pengukuran aktivitas yang disertai dengan nilai ketidakpastian hasil pengukurannya. Dengan demikian *inner capsule* telah terstandarisasi. Nilai aktivitas dalam sertifikat hasil standarisasi dapat digunakan sebagai dasar pembuatan sertifikat kendali kualitas dan pembuatan tabel peluruhan (*decay charts*) untuk memudahkan pengguna di lapangan.

Karena pada tahap ini pengujian dilakukan oleh pihak yang kompeten dan independen maka

keluaran dari tahapan ini adalah produk daur ulang yang telah lolos uji jaminan kualitas dan terstandarisasi. Dengan demikian produk ini mempunyai tingkat keselamatan radiasi yang lebih baik.

Kajian proses pengujian zat radioaktif terbungkus ^{60}Co hasil daur ulang sebagai zat radioaktif bentuk khusus

Guna memenuhi persyaratan sebagai produk bentuk khusus, zat radioaktif terbungkus ^{60}Co hasil daur ulang harus diuji di laboratorium terakreditasi. Permohonan pengujian produk hasil proses daur ulang ke laboratorium terakreditasi ini disampaikan dengan melampirkan [5,6,7,9]:

1. Gambar teknis *inner capsule* yang berisi zat radioaktif terbungkus ^{60}Co hasil daur ulang.
2. Gambar teknis wadah tempat *inner capsule* yang berisi zat radioaktif terbungkus ^{60}Co hasil daur ulang,
3. Sertifikat hasil standarisasi zat radioaktif terbungkus ^{60}Co hasil daur ulang,
4. Sertifikat kendali kualitas zat radioaktif terbungkus hasil daur ulang,
5. Sertifikat bebas kontaminasi untuk bungkusan yang berisi produk ^{60}Co hasil proses daur ulang,
6. Dokumen "To Whom It May Concern" untuk bungkusan yang berisi produk ^{60}Co hasil proses daur ulang,
7. Persetujuan pengiriman zat radioaktif dari BAPETEN.

Jenis pengujian yang diberlakukan terhadap *inner capsule* yang berisi zat radioaktif terbungkus ^{60}Co hasil daur ulang sebagai bentuk khusus meliputi uji tumbuk, uji tembus, uji suhu, uji getar, uji tekanan eksternal, uji tekuk dan uji kebocoran sebagaimana ditetapkan di dalam ketentuan tentang Proteksi Radiasi Sumber radioaktif Tertutup Bagian I: Persyaratan Dan Klasifikasi (SNI 18-6650.1-2002) [12] dan Proteksi Radiasi Sumber radioaktif Tertutup Bagian II: Metode Uji Kebocoran (SNI 18-6650.2-2002) yang diterbitkan oleh Badan Standarisasi Nasional [13]. Dari hasil pengujian zat radioaktif terbungkus dan/atau bentuk khusus ^{60}Co hasil daur ulang akan diperoleh sertifikat hasil uji yang dapat digunakan sebagai salah satu syarat untuk permohonan penerbitan sertifikat bentuk khusus ke BAPETEN.

Hasil kajian menunjukkan bahwa tahap ini merupakan tahap yang paling ketat dan krusial dari aspek kualitas produk. Hanya sumber ^{60}Co daur ulang yang benar-benar berkualitas dan memenuhi SNI yang akan lolos dari pengujian.

Sumber yang tidak berkualitas akan gugur pada tahap pengujian ini.

Kajian proses penerbitan sertifikat bentuk khusus untuk zat radioaktif terbungkus ^{60}Co hasil daur ulang oleh BAPETEN.

Produk zat radioaktif terbungkus ^{60}Co hasil daur ulang yang sudah dinyatakan lolos uji sebagai zat radioaktif bentuk khusus harus memiliki sertifikat bentuk khusus. Penerbitan sertifikat bentuk khusus ini adalah merupakan kewenangan BAPETEN.

Adapun kelengkapan dokumen yang dipersyaratkan untuk mendapatkan sertifikat bentuk khusus dari Bapeten adalah [9] :

1. Gambar teknis *inner capsule* yang berisi zat radioaktif terbungkus ^{60}Co hasil daur ulang.
2. Sertifikat hasil standarisasi zat radioaktif terbungkus ^{60}Co hasil daur ulang.
3. Sertifikat kendali kualitas zat radioaktif terbungkus ^{60}Co hasil daur ulang.
4. Dokumen laporan hasil uji zat radioaktif bentuk khusus ^{60}Co hasil daur ulang.

Hasil kajian menunjukkan bahwa Bapeten merupakan benteng terakhir lolosnya produk daur ulang zat radioaktif terbungkus ^{60}Co yang berkualitas. Bapeten tidak akan mengeluarkan sertifikat manakala persyaratan teknis yang harus dipenuhi pada tahap =tahap sebelumnya tidak terpenuhi.

KESIMPULAN

Pilihan untuk mendaur ulang sumber radiasi ^{60}Co 'yang sudah tidak digunakan' adalah tindakan yang layak untuk dilakukan karena selain masih mempunyai nilai ekonomi yang tinggi, juga akan menghambat sumber radiasi tersebut untuk segera menjadi sekedar limbah yang akan menambah beban pengelolaannya bagi PTLR. Mengingat potensi bahaya proses daur ulang, maka proses ini harus didahului dengan suatu kajian keselamatan yang komprehensif. Dari kajian tersebut akan dapat dievaluasi kelayakannya untuk dijadikan rekomendasi menuju langkah berikutnya. Berdasarkan proses daur ulang yang baku, maka tahapan yang dapat dinilai cukup kritis dan harus dilakukan dengan penuh kehati-hatian adalah tahap pengeluaran sumber dari pembungkusan lama, pemindahan ke tempat transit di *hot cell* dan pemasukan kembali ke wadah yang baru. Produk daur ulang sumber radiasi ^{60}Co terjamin aman untuk digunakan karena sudah melalui tahap standarisasi, pengujian dan sertifikasi oleh institusi yang kompeten.,

DAFTAR PUSTAKA

1. Sekretariat Negara, *Peraturan Pemerintah No. 61 Tahun 2013 Tentang Pengelolaan Limbah Radioaktif*, Jakarta (2013).
2. International Commission on Radiological Protection (ICRP) Publication 107. *Nuclear decay data for dosimetric calculations*, Annals of the ICRP 38-3 (2008),
3. David S. Smith and Michael G. Stabin, *Exposure rate constants and lead shielding values for over 1100 radionuclides*, Health Physics 102-3 (2012), DOI: 10.1097/HP.0b013e318235153a
4. Falah Abu-Jarad, *The application of radiation sources in the oil and gas industry and shortages in their services*, Atoms for Peace: an International Journal (AFP) 2 - 4 (2009)
5. Muhammad, Suhaedi, *Kajian Keselamatan Untuk Proses Daur Ulang Zat Radioaktif Terbungkus ^{137}Cs dan ^{60}Co* , Dipresentasikan Dalam Rapat Konsultasi Antara PT. Batan Teknologi (Persero) Dengan BAPETEN, Tanggal 14 Juni 2000, Serpong (2000).
6. Muhammad, Suhaedi, *Proses Daur Ulang (Recycle) Zat Radioaktif Terbungkus ^{137}Cs dan ^{60}Co Untuk Logging Minyak Dan Batubara*, Dipresentasikan Dalam Rapat Konsultasi Antara PT. Batan Teknologi (Persero) Dengan BAPETEN, Tanggal 14 Juni 2000, Serpong (2000).
7. Divisi Produksi Radioisotop, *Petunjuk Pelaksanaan Proses Daur Ulang Zat Radioaktif Terbungkus ^{60}Co* , Nomor Dokumen BT141-A01-037, Serpong (2000).
8. Divisi Produksi Radioisotop, *Petunjuk Pelaksanaan Proses Daur Ulang Zat Radioaktif Terbungkus ^{137}Cs* , Nomor Dokumen BT141-A01-038, Serpong (2000).
9. Muhammad, Suhaedi, *Pengelolaan Zat Radioaktif Terbungkus Yang Tidak Digunakan Berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 61 tahun 2013*, Seminar Nasional Teknologi Pengelolaan Limbah XII (2014).
10. Badan Tenaga Nuklir Nasional, *Peraturan Kepala BATAN Nomor 7 Tahun 2017 tentang Penggunaan Kembali (Reuse) dan Daur Ulang (Recycle) Zat Radioaktif Terbungkus Yang Tidak Digunakan*, Jakarta (2017).
11. Annette Rolle, Tino Neumeyer, Bernhard Droste Rolle, *Testing of sealed radioactive source at BAM*, Proceedings of Third European IRPA Congress, Helsinki, Finland (2010).
12. Badan Standarisasi Nasional, *Proteksi Radiasi Sumber radioaktif Tertutup Bagian I: Persyaratan Dan Klasifikasi (SNI 18-6650.1-2002)*, Jakarta, (2002).
13. Badan Standarisasi Nasional, *Proteksi Radiasi Sumber radioaktif Tertutup Bagian II : Metode Uji Kebocoran (SNI 18-6650.2-2002)*, Jakarta, (2002).

STUDI LITERATUR “PENGUKURAN LAJU EMISI NEUTRON (FLUENS) DENGAN SISTEM MANGANESE SULPHATE BATH (MnSO₄.H₂O)”

Nazaroh

Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi
Jl. Lebak Bulus Raya No. 49, Jakarta Selatan
nazaroh_s@batan.go.id

ABSTRAK

STUDI LITERATUR “PENGUKURAN LAJU EMISI NEUTRON (FLUENS) DENGAN SISTEM MANGANESE SULPHATE BATH (MnSO₄.H₂O)”. Salah satu tugas PTKMR-BATAN sebagai laboratorium acuan nasional atau SSDL (*Secondary Standard Dosimetry Laboratory*) di bidang metrologi radiasi adalah pemeliharaan ketertelusuran standar tingkat nasional untuk satuan aktivitas, dosis, (termasuk juga fluens). PTKMR-BATAN belum memiliki fasilitas, sarana dan prasarana manganese bath, namun tujuan penulis melakukan studi literature ini karena pengukuran laju emisi neutron dengan metode manganese sulphate bath sangat penting dan bila telah memiliki peralatannya, metode ini dapat digunakan untuk mensertifikasi sumber neutron “orphan source”. Interkomparasi pengukuran laju emisi neutron AmBe, telah diselenggarakan oleh BIPM pada tahun 2005, diikuti oleh 8 partisipan : CIAE (China), CMI (Republik Czech), KRISS (Korea), LNE-LNHB (Perancis), LNMRI (Brazil), NPL (UK), VNIIM (Rusia), dan NIST (USA). Prinsip dari metode MnSO₄.H₂O bath adalah neutron yang datang dan memasuki bath, ditermalkan dan ditangkap larutan MnSO₄ oleh berbagai inti yang ada di dalam bath dan dengan fraksi tertentu ditangkap oleh ⁵⁵Mn. Laju disintegrasi absolut dari ⁵⁶Mn diukur dengan sistem pencacah koinidensi 4πβγ atau metode lain dan dengan menggunakan persamaan Axton, dapat diperoleh laju emisi neutron yang datang”. Koreksi dilakukan terhadap *neutron leakage*, *self capture* dan *fast neutron capture* oleh sulfur dan oksigen menggunakan sistem kode transport MCNP (Monte Carlo N-particle)-ENDF/B-VI cross section. Berdasarkan uji χ^2 , hasil interkomparasi laju emisi neutron rata-rata dari ke 6 partisipan adalah : $(2,438 \pm 0,088) \cdot 10^6$ n/s.

Kata kunci: laju emisi neutron dan Manganese sulphate bath

ABSTRACT

LITERATURE STUDY "MEASUREMENT OF NEUTRON EMISSION RATE (FLUENCE) WITH MANGANESE SULPHATE BATH SYSTEM (MnSO₄.H₂O)". One of PTKMR-BATAN's duties as a national reference laboratory or SSDL (*Secondary Standard Dosimetry Laboratory*) in the field of radiation metrology is maintenance of national standard traceability for units of activity, dose, (including fluence). PTKMR-BATAN does not yet have facilities, equipment and infrastructure of manganese bath, but the author's purpose is to study this literature because the measurement of neutron emission rate by manganese sulphate bath method is very important and if PTKMR have had the equipment, this method can be used to certify the source of neutron "orphan source". Intercomparison of AmBe neutron emission rate measurement, have held by BIPM in 2005, followed by 8 participants: CIAE (China), CMI (Czech Republic), KRISS (Korea), LNE-LNHB (France), LNMRI (Brazil), NPL UK, VNIIM (Russia), and NIST (USA). The principle of the MnSO₄.H₂O bath method is a neutron that comes and enters the bath, terminated and captured by MnSO₄ solution with various nuclei present in bath and with a certain fraction captured by ⁵⁵Mn. The absolute disintegration rate of ⁵⁶Mn is measured by a 4 πβγ coincidence counting system or other method and by using the Axton equation, an incoming neutron emission rate can be obtained ". Correction is made to neutron leakage, self capture and fast neutron capture by sulfur and oxygen using MCNP transport system code (Monte Carlo N-particle) -ENDF / B-VI cross section. Based on the test χ^2 , the intercomparison result of the average neutron emission rate from the 6 participants is: $(2,438 \pm 0.088) \cdot 10^6$ n / s.

Keywords: emission rate and Manganese sulphate bath.

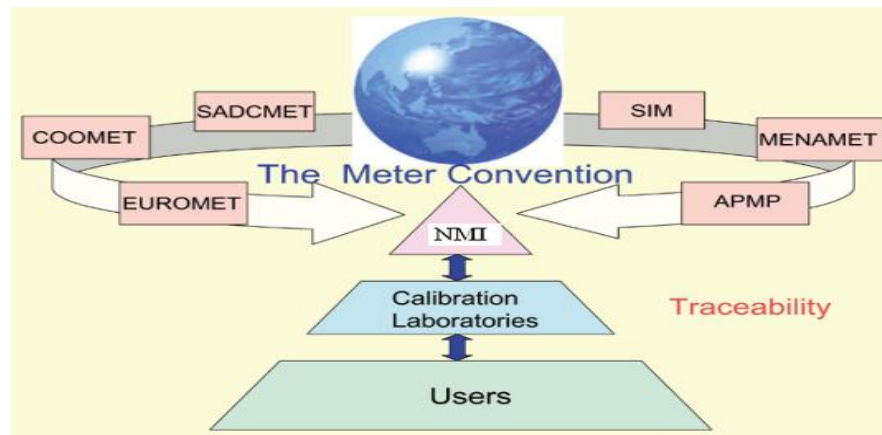
PENDAHULUAN

Metrologi Neutron adalah ilmu pengetahuan yang mempelajari tentang pengukuran neutron. Besaran fisika primer dalam metrologi neutron adalah laju emisi neutron dan fluens neutron. Laju emisi neutron, dN/dt adalah jumlah neutron yang dipancarkan oleh suatu sumber, dan fluens neutron, dN/dA adalah jumlah neutron yang melalui suatu area persatuan waktu [1].

BIPM (*Bureau Internationale des Poids et Mesures*) adalah badan internasional yang

mengurus tentang ukuran. Salah satu tugasnya mengkoordinir NMI (*National Metrology Institute*) dengan kewenangan “Konvensi meter” [2], yang merupakan sebuah perjanjian diplomatik antara 55 negara, beroperasi melalui serangkaian Komite Konsultatif, yang anggotanya adalah NMI dari negara penandatangan. Komite Konsultatif untuk Radiasi Pengion (CCRI) memiliki tiga bagian: bagian (I) berkaitan dengan dosimetri radiasi, bagian (II) berkaitan dengan metrologi radionuklida dan bagian (III) berkaitan dengan metrologi neutron.

Pada Gambar 1 disajikan hierarki *traceability* pengukuran berdasarkan *The Meter Convention*.



Gambar 1. Hierarki *Traceability* Pengukuran berdasarkan *The Meter Convention* [2].

Di Indonesia, PTKMR-BATAN adalah NMI (*National Metrology Institute*) di bidang radiasi, namun belum memiliki fasilitas dan peralatan *manganese sulphate bath* apalagi berpartisipasi dalam interkomparasi di bidang metrologi neutron.

Pada Pasal 159, Peraturan Kepala Badan Tenaga Nuklir Nasional Nomor 14 Tahun 2013 [3] tentang Organisasi dan Tata Kerja Badan Tenaga Nuklir Nasional, dalam melaksanakan tugas, bidang Metrologi Radiasi, PTKMR-BATAN menyelenggarakan fungsi: pelaksanaan penelitian dan pengembangan di bidang standarisasi radionuklida, kalibrasi alat ukur dosis radiasi, audit dosimetri dan pemeliharaan ketertelusuran standar tingkat nasional satuan ukuran aktivitas zat radioaktif dan dosis radiasi pengion.

Salah satu tugas PTKMR-BATAN sebagai laboratorium acuan nasional atau SSDL-Jakarta (*Secondary Standard Dosimetry Laboratory*) di bidang metrologi radiasi adalah memelihara ketertelusuran standar tingkat nasional untuk satuan aktivitas, dosis, (termasuk juga fluens). Di samping itu melakukan standarisasi : aktivitas radionuklida dan dosis (termasuk juga fluens).

PTKMR-BATAN belum memiliki fasilitas, sarana dan prasarana *manganese sulphate bath*, namun penulis melakukan studi literatur ini karena metode *manganese sulphate bath* sangat penting dan bila PTKMR telah memiliki peralatan ini, metode ini bermanfaat untuk menentukan laju emisi sumber neutron sehingga dapat mensertifikasi sumber neutron ‘orphan source’.

Metode ini telah *establish* di beberapa laboratorium seperti : CIAE (China), CMI (Republik Czech), KRISS (Korea), LNE-LNHB (Perancis), LNMRI (Brazil), NPL (UK), VNIIM (Rusia), dan NIST (USA). Bahkan 8 laboratorium

ini telah mengikuti kegiatan antar banding pengukuran laju emisi neutron yang diselenggarakan oleh BIPM pada tahun 1999 dan 2005 [2], sebagai perwujudan *traceability* pengukuran neutron.

Ada 3 metode untuk penentuan laju emisi neutron secara absolut, yaitu : metode partikel gabungan (*the associated particle method*), metode *cross section* standar, dan metode *bath*. Namun banyak laboratorium di dunia yang memilih metode *bath* karena lebih simpel dan tampak lintang neutron thermal *manganese* besar dan akurat. Metode *manganese bath* rentang neutronnya lebar dari 1 keV – 10 MeV. Pada sistem *bath* ini, diperlukan sistem sirkulasi yang kontinu selama iradiasi, sehingga memungkinkan kita untuk mengukur aktivitas induksi mangan terus menerus selama penyinaran [4]

TEORI

Teknik *manganese sulphate bath* ($\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) merupakan metode penentuan laju emisi neutron secara absolut dari sumber neutron radionuklida. Prinsip utama dari pengukuran tersebut merupakan aplikasi khusus dari analisis aktivasi neutron (AAN).

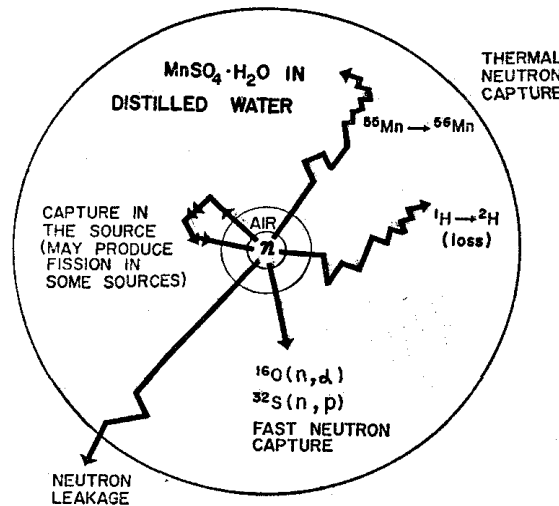
Sphere bath diisi dengan larutan MnSO_4 pekat yang sangat murni dan dilarutkan dalam *distilled water*. Untuk mengaktifkan larutan $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, sumber neutron (misal AmBe) ditempatkan di tengah *bath*.

Neutron yang dipancarkan oleh sumber AmBe akan berinteraksi dengan larutan $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ dan akan melambat menjadi neutron thermal, terutama oleh interaksi elastis dengan inti hidrogen. Selanjutnya neutron thermal ditangkap oleh inti mangan dan

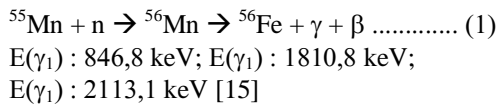
oleh inti lain dari komponen larutan (H, S, dan O), lihat Gambar 2 [4,8,11].

Penampang lintang neutron thermal inti oksigen, $\sigma_{th}(O)$ terlalu kecil karena itu interaksinya

dapat diabaikan. Tangkapan oleh hidrogen dan sulfur menghasilkan isotop stabil. Tangkapan neutron oleh inti mangan (Mn) menghasilkan inti ^{56}Mn yang radioaktif (persamaan 1).



Gambar 2. Diagram Prinsip Metode $MnSO_4.H_2O$ bath dalam *distilled water* [8]



Seperti yang telah disebutkan di atas, bagian tertentu dari neutron thermal juga ditangkap oleh inti dari komponen larutan. Jika *vessel spherical bath* memiliki dimensi yang terbatas, beberapa neutron, bocor dari *vessel*, karena itu kedua efek tsb perlu dikaji dengan pengukuran atau perhitungan faktor koreksi. Rincian dan evaluasi individu semua faktor koreksi dapat ditemukan di berbagai makalah [4, 9, 10].

^{56}Mn memiliki waktu paruh ($2,5785 \pm 0,0002$) jam. Dari pengukuran jumlah inti ^{56}Mn dengan menggunakan sistem pencacah spektrometri gamma atau sistem koinsidensi $4\pi\beta\gamma$, aktivitas ^{56}Mn dapat ditentukan dan dengan persamaan (2) laju emisi neutron, Q dapat dihitung.

$$Q = \frac{Am.M}{f(1-\delta)} \dots\dots\dots(2)$$

- Q : Laju emisi neutron dalam $4\pi sr$ [n/s]
- Am : Aktivitas massa ^{56}Mn dari bath saat saturasi [Bq/kg]
- M : Massa total larutan [kg]
- f : Probabilitas tangkapan neutron oleh Mn dalam bath dibagi inti lain dalam larutan

δ : Factor Koreksi terdiri dari probabilitas reaksi neutron (n, α) dan (n, p) dengan belerang, reaksi(n, α) dengan oksigen, probabilitas tangkapan kembali oleh sumber itu sendiri dan oleh fraksi neutron yang lolos dari vessel [4, 9, 10].

Mayoritas laboratorium, menghitung fraksi tangkapan neutron oleh inti Mn dengan menentukan kehilangan fraksi (*fraction loss*). Dua pengecualian : CMI dan KRIS menghitung fraksi *Mn capture* secara langsung menggunakan MCNP. Dengan menggunakan pers. Axton [6], Laju emisi sumber neutron dapat dihitung dengan persamaan (3)

$$Q = \frac{A}{\epsilon f (1 - O - S - L)} \dots\dots\dots(3)$$

Efisiensi pencacahan, ϵ dapat dihitung dengan persamaan (4)

$$\epsilon = \frac{N(t)}{A(t)} \dots\dots\dots(4)$$

- Q :laju emisi sumber neutron
- A :aktivitas ^{56}Mn yang dihasilkan di dalam bath.
- ϵ :efisiensi pencacahan, yang didefinisikan sebagai laju cacah persatuan disintegrasi Mn
- O :fraksi kehilangan neutron akibat tangkapan fast neutron (di dalam O dan S).
- S :fraksi neutron yang ditangkap oleh sumber

dan penyangga.
 L :fraksi neutron yang lolos dari bath
 f :fraksi neutron yang tinggal dan ditangkap
 Mn.

TATA KERJA

Sumber neutron yang digunakan dalam interkomparasi pengukuran laju emisi neutron adalah $^{241}\text{Am-Be}$ (α, n) (model AMN22, nomor seri AMN1000 / 1096) milik NPL, aktivitas nominal 37 GBq (1 Ci). Sumber AmBe dibungkus dalam kapsul X3 (panjang: 31 mm, diameter : 22,4

mm), diproduksi oleh QSA global. Sumber ini dipilih karena waktu paruhnya panjang, dan umumnya digunakan di laboratorium kalibrasi.

Setelah NPL melakukan pengukuran pertama, sumber dikirim ke peserta pertama, setelah selesai pengukuran, peserta tersebut mengirimkan ke peserta berikutnya sesuai jadwal yang dibuat NPL, terakhir sumber kembali ke NPL untuk pengukuran ulang.

Pada Tabel 1. Disajikan peralatan *manganese bath* di NIST (USA) dan NPL (united Kingdom)

Tabel 1. Contoh Peralatan *manganese bath* di NIST (USA) dan NPL (united Kingdom)

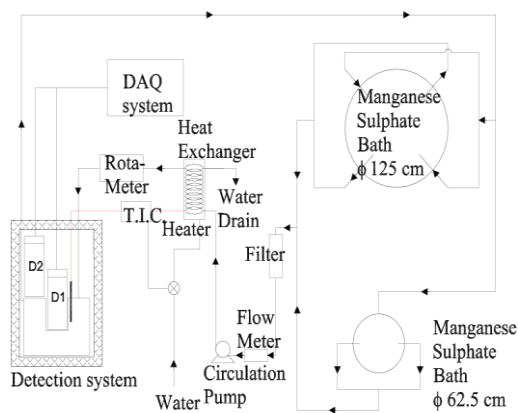
Peralatan <i>manganese bath</i> di NIST	Peralatan <i>manganese bath</i> di NPL [11]
<i>Manganese bath (MnSO₄.H₂O)</i>	<i>Large and small baths (98 dan 50 cm)</i>
Sumber neutron AmBe (model AMN22, S/N : AMN1000/1096)	<i>Manganese sulphate solution (> 500 litres)</i>
Pompa Marathon Electric, untuk sirkulasi larutan MnSO ₄	<i>Large and small stainless steel spheres and vacuum rods for mounting the source in the bath</i>
Pemegang sumber dari bahan teflon	<i>Moderator detector Assembly</i>
<i>Stepping motor</i> , beberapa katrol dan tali	<i>Long counter</i>
Sistem filter air (<i>Barnstead B-pure</i>)	<i>Circulating and stirring pumps</i>
	<i>In-line filter</i>
Peralatan di ruang kontrol NIST (Gambar 4	<i>Four NaI scintillators and photo-multiplier tubes (PMTs)</i>
<i>Manipulator remote</i>	<i>Large and small counting reservoirs</i>
<i>Step-Pak MCU-2 stepping motor controller</i>	<i>Float gauge</i>
2 detektor Bicron ("main" dan "remote") : Kristal sodium iodide dan photomultipliers	<i>Lead castles around counting reservoirs</i>
<i>Marinelli beaker stainless steel housing the "main" detector</i>	<i>Biscuit tin" neutron shielding around counting reservoirs</i>
2 Ortec 556 high voltage (HV) power supplies untuk photomultiplier tubes	<i>Electronics for NaI detector, long counter and moderator detector</i>
2 Ortec preamps for photomultiplier outputs	<i>Data acquisition PC</i>
2 Ortec linear amplifiers	<i>Balance</i>
2 NIST-built constant deadtime discriminators	<i>Furnace</i>
3 buah counter Ortec 772	
Counter timer Ortec 776	
Tennelec TC 566A time of day, year clock	
Ortec 779 interface controller	
Computer running Procomm and in-house analysis software	
<i>Generic precision pulse generator</i>	
Tracor Northern TN-7200 multichannel analyzer (MCA)	



Gambar 3: Ruang MnSO₄ bath di NIST



Gambar 4: Ruang Kontrol MnSO₄ bath di NIST



Gambar 5a. Skema Sistem *Manganese Sulphate Bath* di KRIS.



Gambar 5b. Dua bath dan sistem transfer sumber pada sistem manganese bath NPL

Ada dua *spherical manganese sulphate bath* di KRIS (Korea Research Institute of Standards and Science), berdiameter 125 cm dan 62.5 cm, disajikan pada Gambar 5a. Kedua bath terbuat dari stainless steel tebal 3 mm. Bath yang lebih kecil didesain untuk pengukuran laju emisi lebih rendah. Di NPL juga terdapat dua *spherical bath* (berdiameter 98 cm dan 50 cm), Gambar 5b..

Spherical bath diisi dengan larutan MnSO₄ kemurnian tinggi (99,98 %). Konsentrasi berat Mn dalam larutan : 0,046798 ± 0,16 %, dan densitas larutan : 1,0459 g/cm³ ± 0,0091 % pada 20 °C. Rasio densitas inti hydrogen (H) terhadap inti mangan (Mn), $N_H/N_{Mn} = 341,44 \pm 0,16$ %. Parameter *manganese sulphate bath* di KRIS dan lab-lab lain untuk pengukuran laju emisi neutron disajikan pada Tabel 2.

Di KRIS, ⁵⁵Mn diiradiasi menggunakan medan thermal neutron di reaktor HANARO [5,11] dan dilarutkan dengan 50 ml dari 0.1N larutan HCl. Aktivitas ⁵⁶Mn yang diproduksi di reaktor dapat dikontrol dengan perubahan fluks neutron dan waktu iradiasi di reaktor, sehingga perhitungan sederhana menggunakan tampang lintang tangkapan neutron dapat memberikan taksiran kasar aktivitas sampel.

Larutan ⁵⁶Mn dibagi dua bagian melalui proses penimbangan, satu bagian dituang ke dalam bath dan digunakan untuk pengukuran laju cacah *system manganese sulphate bath*. Lainnya digunakan untuk menentukan aktivitas spesifik dengan metode Pencacah koinidensi 4πβγ.

Selama pengukuran, larutan diaduk dan disirkulasi dengan laju aliran ±10 liter/menit, melalui *beaker Marinelli*- volume (±10 liter). Skema dari sistem sirkulasi dan sistem deteksi disajikan pada Gambar 3. Dua detector NaI(Tl) (D₁ dan D₂) yang disajikan pada Gambar 5a), mengukur gamma yang dipancarkan ⁵⁶Mn. Energi primer gamma adalah 846,8 keV, 1810,8 keV, dan 2113,1 keV [4,10,15]. Pengukuran dimulai ketika ⁵⁶Mn saturasi (setelah penyinaran 10x waktu paro ⁵⁶Mn).

Detektor bath diberi perisai Pb, tebal 10 cm, untuk mengurangi radiasi *background* ruangan. Dua pengukuran absolut terhadap laju emisi dilakukan dengan 2 detector NaI(Tl) yang berdimensi sama ϕ: 3.81cm × 3.81 cm. Detector yang satu diletakkan pada pusat lubang beaker Marinelli dan yang lainnya di atas beaker dan parallel ke pusat detector. Efisiensi pencacahan diukur 3x secara independen, dan hasil dari semua pengukuran konsisten.

Tabel 2. Parameter *Manganese Sulphate Bath* di KRISS dan di beberapa laboratoria [5]

Laboratorium	Ukuran bath (cm)	N _H /N _{Mn}	Metode Koreksi	Sistem Pencacahan
CIAE	100	58,08	In-house	Sirkulasi larutan
CMI	100	61,4	MCNP	Detector statis
KRISS	125	341,44	MCNP	Sirkulasi larutan
LNE-LNHB	100	49,17	MCNP	Ekstraksi sampel
LNMRI	100	30,09	MCNP-inhouse	Detector statis
NIST	129	54	In-house	Sirkulasi larutan
NPL	98	33,5	MCNP	Sirkulasi larutan
VNIIM	85	48,846	inhouse	Detector statis

Tabel 3. Faktor Koreksi O, S, dan L dari berbagai laboratorium untuk perhitungan laju emisi neutron [5]

Laboratorium	N _H /N _{Mn}	Tangkapan cepat O & S (O) %	Tangkapan <i>Source Assembly</i> (S) %	Kebocoran (L) %	Fraksi tangkapan thermal Mn (f)	f(1-O-S-L)
CIAE	58,08	3	0,4	1,5	0,4088	0,3888
CMI	61,4					0,367
KRISS	341,44					0,1023
LNE-LNHB	49,17	3,5	20	1,5	0,4434	0,424
LNMRI	30,09	2,731	0,08	1,112	0,563	0,5369
NIST	54	2,879	0,823	0,257	0,5371	
NPL	33,5	3,33	1,57	1,41	0,4474	0,5032
VNIIM	48,85	2,8	0,1	3,2		0,4201

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tampang lintang neutron thermal inti O ($\sigma < 0,002$ barn) sangat kecil, dibandingkan dengan inti lainnya (Mn, S, dan H). Tangkapan neutron oleh H menghasilkan inti yang stabil, Tangkapan neutron oleh belerang menghasilkan inti ³³S. Tangkapan neutron oleh ⁵⁵Mn menghasilkan ⁵⁶Mn radioaktif, yang mempunyai waktu paro (2,5785±0,0002) jam. Dari pengukuran jumlah inti ⁵⁶Mn, akan mencerminkan laju emisi (Q) dari sumber neutron.

Aktivitas ⁵⁶Mn dapat ditentukan dengan pencacah koinidensi 4πβγ atau system pencacah spektrometri gamma. Efisiensi pencacahan (ε) dari detektor sintilator ditentukan menggunakan larutan ⁵⁶Mn yang sudah diketahui aktivitasnya. Larutan ⁵⁶Mn yang sudah diketahui aktivitasnya dicampur dengan larutan MnSO₄ di dalam bath. Gamma yang dipancarkan dari peluruhan ⁵⁶Mn kemudian diukur dengan system pencacah. Efisiensi pencacahan, ε dapat dapat dihitung menggunakan persamaan (4);

$$\epsilon = \frac{N(t)}{A(t)} \dots\dots\dots(4)$$

N(t) : laju cacah dikoreksi *dead-time*, diukur oleh detektor pada waktu t.

A(t) : aktivitas ⁵⁶Mn dalam bath pada waktu t. Karena waktu paro ⁵⁶Mn agak pendek (2,5785 jam), maka pengukuran ⁵⁶Mn dilakukan segera setelah diproduksi.

MCNP code version 4C digunakan untuk menghitung probabilitas produksi ⁵⁶Mn per neutron yang dipancarkan dari sumber. Penghitungan laju emisi neutron dikoreksi terhadap *neutron leakage*, *neutron capture*, oleh materi sumber dan perangkat penyangga, reaksi neutron dengan hidrogen, oksigen dan inti sulfur, dan tangkapan epitermal oleh inti Mn.

Pada Tabel 3. disajikan factor koreksi O, S, dan L dari berbagai laboratorium, yang digunakan dalam menghitung laju emisi neutron. Nilai O, S, L bergantung pada energi sumber, konsentrasi larutan, materi dan geometri dari penyangga sumber, ukuran dan bentuk bath. Bagian dari spectrum energi, parameter lain bervariasi dari partisipan satu ke partisipan lain. Jadi tidak mungkin membandingkan nilai O, S, L secara langsung. Fraksi thermal, f terhadap Mn (f_{Mn}), bervariasi dengan konsentrasi larutan jika impuritas larutan diabaikan.

Laju emisi neutron AmBe yang dikirim partisipan ke BIPM disertai dengan ketidakpastian

bentangan, disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4: Laju Emisi neutron AmBe yang dikirim ke BIPM disertai dengan ketidakpastian bentangan [5].

Laboratorium	Laju Emisi ($\times 10^6 \text{ n.s}^{-1}$)	
CIAE	2,380	0,031
CMI	2,432	0,039
KRISS	2,442	0,029
LNE-LNHB	2,299	0,064
LNMRI	2,440	0,028
NIST	2,409	0,053
NPL*	2,432	0,030
VNIIM#	2,470	0,024
Rata-rata =	2,413	0,038

Dari pengukuran laju emisi neutron AmBe yang dikirimkan 8 partisipan ke BIPM diperoleh rata-rata = $(2,413 \pm 0,038) \cdot 10^6 \text{ n.s}^{-1}$ (disajikan pada Tabel 3).

Dengan me-*reject* pengukuran CIAE dan LNE-LNHB, laju emisi rata-rata dari 6 partisipan $2,438 \times 10^6 \text{ n.s}^{-1}$, ketidakpastian standar gabungan $0,088 \times 10^6 \text{ n.s}^{-1}$. Hasil VNIIM tidak di-*reject* karena nilai tersebut tidak *significant difference* dibandingkan dengan nilai dari 6 partisipan.

CIAE menghitung kembali faktor koreksi cross-sections menggunakan MCNP dengan ENDF/B-VI, nilai laju emisinya menjadi $2,43 \cdot 10^6 \text{ n.s}^{-1}$. Nilai revisi ini bersesuaian dengan hasil dari partisipan lain, tetapi nilai laju emisi neutron CIAE tidak dimasukkan ke dalam hasil interkomparasi karena revisi datanya dikirim setelah hasil interkomparasi diluncurkan.

LNE-LNHB melakukan penyelidikan dan memperkirakan konsentrasi N_H/N_{Mn} rendah sehingga mengakibatkan kemungkinan tidak homogen ketika mengambil sampel dari bath, dan akivitasnya cenderung lebih rendah dan biasanya dikarenakan *error* di dalam perhitungan fraksi tangkapan (n, \square) oleh inti mangan. Perhitungan diulang dan laju emisi diperoleh $2,40 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$. Nilai ini sedikit lebih rendah dari yang diharapkan, karena koreksi $O(n, \alpha)$ dihitung menggunakan *cross section* ENDF/B-VI.0.

Tidak ada penjelasan dari VNIIM mengapa nilai VNIIM lebih tinggi dari yang lain. Dua nilai pengukuran laju emisi neutron dari VNIIM adalah

$(2,471 \text{ dan } 2,469) \cdot 10^6 \text{ n.s}^{-1}$ dari metode mangan bath dan metode partikel gabungan.

Hasil pengukuran NIST sedikit lebih rendah dibandingkan CMI, KRISS, LNMRI dan NPL karena NIST tidak menggunakan faktor koreksi *cross section* ENDF/B-VI, tetapi menggunakan ENDF/B-V.

Pada Tabel 4. disajikan contoh perhitungan ketidakpastian pengukuran laju emisi neutron oleh LNMRI, dengan *uncertainty budget* yang diperhitungkan adalah : pencacahan (0,07%), efisiensi pencacahan (0,53%), kehilangan O dan S (0,058%), tangkapan sumber (0,15%), kebocoran (L) (0,07%), F(0,13%), *timing* (0,04%), *dead-time* (0,015%), waktu paro ($3,2 \cdot 10^{-7}\%$), sehingga $u_c = 0,5776\%$.

Tabel 4. Komponen Ketidakpastian pengukuran MnSO₄.H₂O bath LNMRI [3]

Sumber ketdkpastian	Nilai	Ktdpastian U(xi) (%)	Distribusi	Pembagi	Ktdkpastian standar u(xi) (%)
Pencacahan	1393,196	0,07	Normal	1	0,07
Eff. Pencacah	1,06855 × 10 ⁻³	0,53	Normal	1	0,53
Kehilangan O dan S	2,731	0,10	Rect.	1,73	0,058
F	0,800	0,26	Rect.	1,73	0,15
Timing	1,112	0,12	Rect.	1,73	0,07
Dead-time	0,563	0,13	Rect.	1,73	0,004
Waktu paro	5,21 × 10 ⁻⁷	0,01	Normal	1	0,015
	5,08 × 10 ⁻¹¹	0,02	Rect.	1,73	3,2 × 10 ⁻⁷
Jumlah Ketidakpastian =					0.5776

Untuk menganalisis hasil interkomparasi laju emisi neutron, digunakan uji Chi Square. Uji chi-square bertujuan untuk menilai independensi/membandingkan dua variabel. Dalam tabel kontingensi (untuk mengetahui apakah itu terkait/ada hubungan), atau data yang kita amati sesuai dengan data yang kita harapkan. Jika nilai χ_c^2 (hitung) lebih rendah dari χ_{crit}^2 (tabel) berarti korelasinya tinggi antara dua set data sebaliknya jika nilai χ_c^2 (hitung) lebih besar dari χ_{crit}^2 (tabel) berarti tidak berkorelasi (*significant difference*).

Analisis Chi Square, χ^2 , menggunakan persamaan (5).

$$\chi_c^2 = \sum \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \dots (5)$$

χ_c^2 : *calculated Chi Square*

E_i : *expected value*, nilai KCRV (*Key Comparison Reference Value*)

O_i : *observed value*, nilai laju emisi yang diukur partisipan

i : posisi dalam tabel kontingensi = (baris-1)*(kolom-1)

Hasil analisis pengukuran laju emisi neutron disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil analisis pengukuran laju emisi neutron 6 partisipan berdasarkan χ^2 .

Hasil	VNIIM		CMI		KRISS		LNMRI		NIST		NPL*	
	O	E	O	E	O	E	O	E	O	E	O	E
Xi	2,470	2,454	2,432	2,435	2,442	2,440	2,440	2,439	2,409	2,423	2,432	2,435
\hat{Y}	2,438	2,454	2,438	2,435	2,438	2,440	2,438	2,439	2,438	2,424	2,438	2,435
Sum =	4,908	4,908	4,87	4,87	4,88	4,88	4,878	4,878	4,847	4,847	4,87	4,87
df =	5											
χ^2 tabel =	11,07											

$\chi_c^2 = 0,000401$, Taraf signifikansi (α) = 0,05; df (*degrees of freedom*) = 5; $\chi_{crit}^2 = 11,07$.

$\chi_c^2 < \chi_{crit}^2 \rightarrow$ artinya hasil pengukuran laju emisi neutron 6 partisipan berkorelasi kuat (tidak berbeda nyata).

DAFTAR PUSTAKA

1. Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 4 Tahun 2013 tentang Proteksi dan Keselamatan Radiasi dalam Pemanfaatan Tenaga Nuklir.

2. Lina Quintieri (2015), The neutron metrology laboratory of ENEA INMRI: Measurement Services and Research Activities, RAIN15—Radiazione per Innovazione 2015.
3. Peraturan Kepala Badan Tenaga Nuklir Nasional Nomor 14 Tahun 2013 tentang

- Organisasi dan Tata Kerja Badan Tenaga Nuklir Nasional.
4. Mien-Win W.V. and Jen Chang Chou (1973), *Absolute Determination of the Fast Neutron Fluxes by Using the Flow-Type Manganese Bath Method*, *Nuclear Energy Research, Atomic Energy Council P. O. Box 3 Lung-Tan, CHINESE JOURNAL OF PHYSICS*, vol. 11 no. 2, Taiwan.
 5. N.J. Roberts^{1*} and L.N. Jones, et al (2011), International Key Comparison of Measurements of Neutron Source Emission Rate (1999-2005) – CCRI(III)-K9.AmBe, *Metrologia* 48.
 6. Axton E J, (1987). *Intercomparison of Neutron-Source Emission Rates* (1979-1984), *Metrologia*, **23**, 129-144.
 7. Sun Tae Hwang, et al (1987), *Impurity Analysis of Domestic MnSO₄.H₂O Introduce of Manganese Bath Method*, *Journal of Korean Association for radiation Protection*, Vol., 12, No,1 (1987).
 8. Branislav Vrban, Štefan Čerba, Jakub Lúley, Filip Osuský, Lenka Dujčíková, Ján Haščik (2016), *Measurement of the neutron emission rate with manganese sulphate bath technique*, *Institute of Nuclear and Physical Engineering, Slovak University of Technology in Bratislava, 81219 Bratislava, Slovakia*, E-mail: branislav.vrban@stuba.sk.
 9. N. J. Roberts, (2011): *MCNP Calculations of Correction Factors for Radionuclide Neutron Source Emission Rate Measurements using the Manganese Bath*, NPL Report CIRM 45, Crown, Teddington, UK.
 10. F. Ogheard, J. L. Chartier, P. Cassette (2012): *Monte-Carlo simulation of the new LNHB manganese bath facility*. *Applied Radiation and Isotopes*, Volume 70, No. 4, 794-801.
 11. H., Park, et al. (2005): *Absolute Measurements of the Neutron Emission Rate with a Manganese Sulphate Bath System*, *Journal of the Korean Physical Society*, Volume 47, No. 4, 603-609.
 12. Neil J Roberts and Lawrence N Jones (2008), NPL Report IR-11, *Commissioning of the new Manganese Bath Suite at the National Physical Laboratory*, ISSN 1754-2952, June, 2008.
 13. Sandro P.Leite, Walsan W. Pereira, Ademir X. Silva, Evaldo S. Fonseca, and Karla C.S. Patrao, *Alternative Irradiation System For Efficiency For Manganese Bath Determination*, 2009, International Nuclear Atlantic Conference – IN AC 2009, Rio de Janeiro,RJ, Brazil, September 27 to October 2, 2009 ISBN: 978-85-99141-03-8
 14. Sun Tae Hwang, Kyung-Ju Lee, Kil Oung-Choi, Won Sik Kim, The Development Study of a Manganese Sulphate Bath System, *J. Korean Assoc. for Radiat. Prot.* Vol. 11, 1986.
 15. Richard B.Firestone, table of Isotopes, 8th edition, Wiley InterScience, New York, 1996.
 16. ISO-8529-1, 2001, Neutron Reference Radiations for Calibrating neutron measuring devices used for radiation protection purposes and for determining their response as a function of neutron energy, ISO, 2001.

DISTRIBUSI VERTIKAL RADIOISOTOP ALAM ^{210}Pb DI TANAH PADA BEBERAPA LOKASI STABIL DAS CISADANE

Nita Suhartini, Barokah Aliyanta
 Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi – BATAN
 Jl. Lebak Bulus Raya No. 49, Jakarta 12440
 e-mail : s-nita@batan.go.id

ABSTRAK

DISTRIBUSI VERTIKAL RADIOISOTOP ALAM ^{210}Pb DI TANAH PADA BEBERAPA LOKASI STABIL DAS CISADANE. Telah dilakukan suatu penelitian yang bertujuan untuk melihat profil distribusi ^{210}Pb pada lapisan tanah di beberapa lokasi stabil untuk dijadikan sebagai lokasi pembanding (*reference site*) di DAS Cisadane - Bogor. ^{210}Pb adalah radioisotop alam sebagai hasil peluruhan panjang dari radioisotop ^{238}U yang terdapat dalam batuan. Lokasi pembanding adalah suatu lokasi dimana tidak ada/sedikit terjadi proses erosi/deposit. Nilai inventori radioisotop alam ^{210}Pb pada lokasi pembanding ini akan digunakan sebagai pembanding terhadap nilai inventori radioisotop alam ^{210}Pb dari lokasi penelitian. Jika nilai inventori ^{210}Pb lokasi pembanding lebih besar dari nilai inventori ^{210}Pb lokasi penelitian mengindikasikan telah terjadi proses erosi (-), jika nilai inventori ^{210}Pb lokasi pembanding lebih kecil dari nilai inventori ^{210}Pb lokasi penelitian mengindikasikan telah terjadi proses deposisi (+). Empat lokasi telah dipilih sebagai lokasi pembanding yaitu Hutan Primer Gn. Salak di Cijeruk (ketinggian 1242 m dpl), Perkebunan teh di Cipelang (ketinggian 694 m dpl), Hutan Pinus di Pasir Jaya (ketinggian 855 m dpl) dan Perkebunan Karet di Rumpin (ketinggian 230 m dpl). Pengambilan sampel menggunakan alat *scraper* (20 x 50) cm dengan interval lapisan 2 cm hingga kedalaman 30 cm, dan untuk nilai inventori ^{210}Pb pengambilan sampel dilakukan pada beberapa titik menggunakan alat *coring* ($d_i = 7$ cm) hingga kedalaman 20 cm. Hasil penelitian memperlihatkan nilai inventori ^{210}Pb adalah 4083 Bq/m², 3619 Bq/m², 7420 Bq/m², dan 3606 Bq/m², masing-masing untuk Hutan Primer Gn. Salak, Perkebunan teh, Hutan Pinus dan Perkebunan karet.

Kata kunci : Erosi/deposisi, radioisotop alam, ^{210}Pb

ABSTRACT

*VERTICAL DISTRIBUTION OF ^{210}Pb ENVIRONMENTAL RADIOISOTOPE AT SOIL IN SOME STABLE SITES OF CISADANE CATCHMENT. This investigation aimed to observe a profile of ^{210}Pb vertical distribution at soil layer in some stable location to be used as reference sites at Cisadane catchment area - Bogor. ^{210}Pb is environmental radioisotope as natural product of ^{238}U decay series at rocks. Reference site is a stable site (undisturbed site) which no or little erosion/deposition occurred. The inventory value of ^{210}Pb environmental radioisotope from reference site will be used as reference to the inventory value of ^{210}Pb environmental radioisotope from the study site. If the inventory value of ^{210}Pb at reference site was higher than inventory value of ^{210}Pb at study site its indicate that erosion (-) was occurred, if the inventory value of ^{210}Pb at reference site was less than inventory value of ^{210}Pb at study site its indicate that deposition was occurred. Four location were selected as reference sites namely Heterogen forest of Salak Mt – Cijeruk (1242 above sea level), Tea Plantation – Cipelang – Cijeruk (694 above sea level), Pine Forest – Pasir Jaya (855 above sea level) and Rubber Plantation – Rumpin (230 above sea level). Sampling was done by using *scraper* (20 x 50) cm with layer increment of 2 cm until the depth of 30 cm, and for inventory value of ^{210}Pb sampling was done using *coring* ($d_i = 7$ cm) until the depth of 20 cm. The result showed that inventory values of ^{210}Pb were 4083 Bq/m², 3619 Bq/m², 7420 Bq/m², and 3606 Bq/m² for Heterogen forest of Salak Mt, Tea Plantation, Pine Forest and Rubber Plantation respectively.*

Keywords : Erosion/deposition, environmental isotope, ^{210}Pb

PENDAHULUAN

^{137}Cs adalah radioisotop buatan manusia dengan waktu paruh 30,2 tahun. Keberadaan radioisotop ^{137}Cs di alam ini adalah merupakan jatuhnya (*fallout*) dari atmosfer sebagai hasil percobaan senjata nuklir. ^{137}Cs secara global telah dapat dideteksi di alam ini sejak 1954, dan fluks yang tertinggi pada belahan bumi bagian utara terjadi pada tahun 1963, sehubungan dengan adanya percobaan senjata nuklir secara besar-besaran yang terjadi pada saat itu. Jatuhnya (*fallout*) ^{137}Cs dari atmosfer berkurang drastis setelah adanya perjanjian percobaan senjata nuklir pada tahun 1963, dan sejak tahun 1970-an

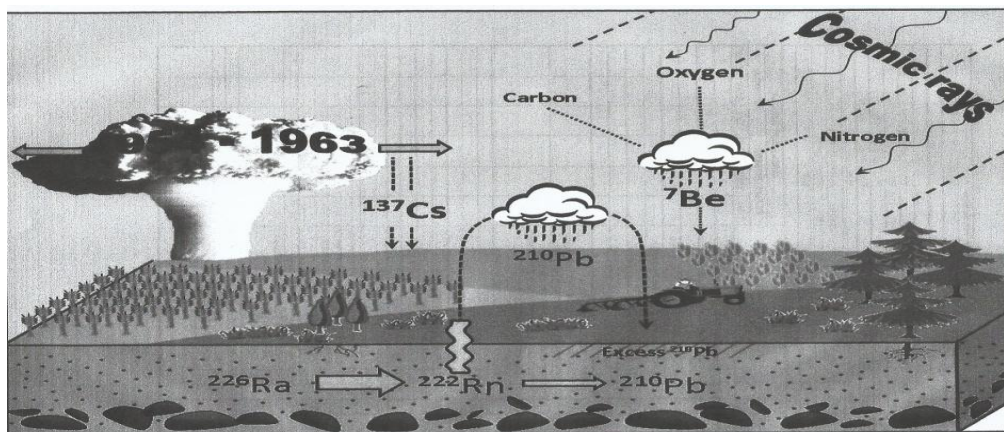
jatuhan ^{137}Cs dari atmosfer menjadi sangat tidak signifikan (hampir tidak ada). Selain dari percobaan senjata nuklir, untuk beberapa wilayah di eropa dan wilayah yang berada berdekatan dengan Rusia, mengalami penambahan jatuhnya ^{137}Cs yang berasal dari peristiwa kecelakaan Chernobyl pada tahun 1986. Jatuhnya (*fallout*) ^{137}Cs ketika menyentuh permukaan bumi akan teradsorpsi secara cepat dan kuat pada permukaan tanah dan kemudian terdistribusi secara vertikal dan lateral bersama-sama dengan pergerakan partikel tanah, kuatnya ikatan ^{137}Cs pada partikel tanah membuat ^{137}Cs dapat

digunakan sebagai perunut (*tracer*) pada pergerakan tanah dan sedimen (1).

Saat ini metode menggunakan radioisotop alam ^{137}Cs sudah banyak diaplikasikan di banyak negara dan memberikan hasil yang baik. Tetapi beberapa hasil penelitian yang dilakukan di Afrika baik skala kecil maupun skala besar (catchment area) seperti di Lesotho (2), Zimbabwe (3) dan Zambia(4), menunjukkan bahwa penggunaan radioisotop alam ^{137}Cs mempunyai keterbatasan yang penting dimana nilai inventori dari ^{137}Cs di daerah tersebut sangat kecil dibandingkan dengan negara-negara dibelahan bumi bagian utara. Sebagai contoh pada saat ini nilai inventori ^{137}Cs di wilayah Amerika utara dan Eropa berkisar antara 2000 sampai dengan 4000 Bq/m², sedangkan nilai inventori ^{137}Cs sebesar 420 Bq/m², 270 Bq/m² dan 252 Bq/m² masing-masing diperoleh dari wilayah Australia, New Zealand dan Zimbabwe (5,6). Sehubungan dengan keterbatasan pada penggunaan ^{137}Cs untuk penelitian erosi tanah di beberapa wilayah di dunia ini, perlu dilakukan suatu penelitian untuk menggunakan radioisotop alam yang lain diantaranya ^{210}Pb .

^{210}Pb adalah suatu radioisotop alam (waktu paruh 22,2 tahun) yang merupakan hasil dari rangkaian peluruhan dari induk radioaktif ^{238}U . ^{210}Pb dihasilkan melalui beberapa rangkaian peluruhan radioaktif umur pendek dari peluruhan gas ^{222}Rn (waktu paruh 3,8 hari) yang merupakan anak luru dari radioaktif alam

^{226}Ra (waktu paruh 1622 tahun). ^{210}Pb yang terdapat di tanah dan batuan merupakan hasil peluruhan secara alam dari ^{226}Ra . ^{226}Ra akan meluruh menjadi ^{222}Rn yang berumur pendek ($t_{1/2} = 3,8$ hari), dimana sebagian kecil dari gas ^{222}Rn ini akan terdifusi ke atas dan terlepas ke atmosfer. Gas ^{222}Rn yang terperangkap di tanah dan batuan akan meluruh menjadi ^{210}Pb yang berada dalam kesetimbangan dengan induknya, dan ini disebut sebagai ^{210}Pb *supported*. Sedangkan gas ^{222}Rn yang terlepas ke atmosfer akan meluruh menjadi ^{210}Pb kemudian jatuh ke permukaan tanah melalui air hujan. Jatuhan (*fallout*) ^{210}Pb ini di permukaan tanah tidak berada dalam kesetimbangan dengan induknya, dan ^{210}Pb jatuhan ini disebut sebagai ^{210}Pb *unsupported* atau *excess* (7). Karena kuatnya daya serap partikel tanah dan sedimen, maka jatuhan ^{210}Pb ketika menyentuh permukaan tanah secara cepat akan teradsorpsi dan melekat sangat kuat pada partikel tanah dan sedimen. Pergerakan ^{210}Pb di tanah dan sedimen secara vertikal dan horizontal disebabkan karena adanya proses erosi, transportasi dan deposit. Oleh karena fenomena ini maka ^{210}Pb *unsupported* atau *excess* sama seperti ^{137}Cs , sehingga dapat digunakan sebagai perunut (*tracer*) untuk penelitian erosi tanah dan asal usul sedimen (8). Gambar proses keberadaan radioisotop alam di permukaan tanah dapat dilihat pada Gambar 1.

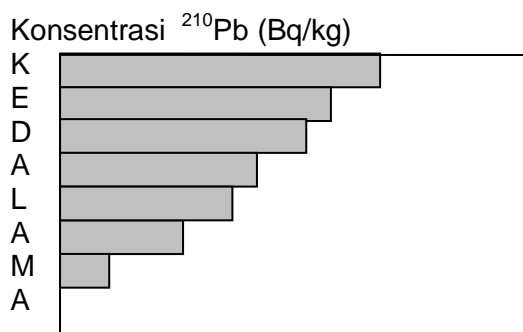


Gambar 1. Proses terjadinya keberadaan radioisotop alam di permukaan tanah (Cosmic ray = sinar kosmis yang berasal dari cahaya matahari)

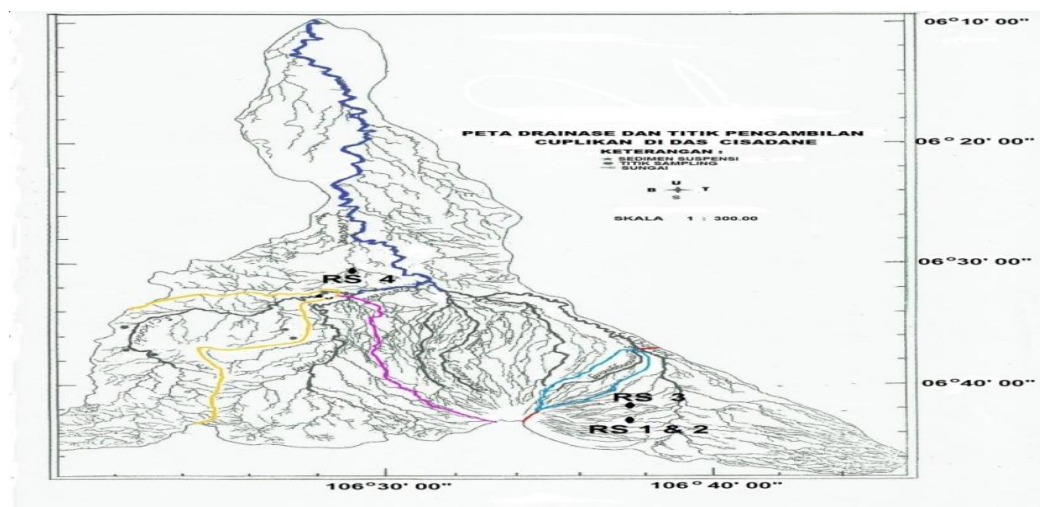
Seperti ^{137}Cs , ^{210}Pb juga mempunyai daya tarik menarik yang kuat dengan partikel sedimen, sehingga ^{210}Pb dapat digunakan untuk memperkirakan laju erosi. Sebelum studi erosi dilakukan, perlu dicari suatu lokasi yang stabil untuk dijadikan sebagai lokasi pembandingan (*reference site*). Lokasi pembandingan adalah suatu lokasi dimana tidak ada/sedikit terjadi proses erosi/deposit. Nilai inventori radioisotop alam

^{210}Pb pada lokasi pembandingan ini akan digunakan sebagai pembandingan terhadap nilai inventori radioisotop alam ^{210}Pb dari lokasi penelitian. Jika nilai inventori ^{210}Pb lokasi pembandingan lebih besar dari nilai inventori ^{210}Pb lokasi penelitian mengindikasikan telah terjadi proses erosi (-), jika nilai inventori ^{210}Pb lokasi pembandingan lebih kecil dari nilai inventori ^{210}Pb lokasi penelitian mengindikasikan telah terjadi proses

deposisi (+). **Tujuan** Penelitian ini adalah mencari informasi tentang distribusi vertikal ^{210}Pb di lapisan tanah pada beberapa lokasi yang stabil, dimana data awal ini akan digunakan untuk memilih lokasi pembandingan dan sebagai petunjuk apakah metode tehnik nuklir menggunakan isotop alam ^{210}Pb untuk memperkirakan erosi tanah dapat diaplikasikan di Indonesia. Berdasarkan informasi dari beberapa literatur profil distribusi vertikal adalah konsentrasi maksimum terdapat pada lapisan atas dan akan menurun secara eksponensial dengan bertambahnya kedalaman, seperti yang terlihat pada Gambar 2 (9).



Gambar 2. Profil distribusi vertikal ^{210}Pb di lapisan tanah pada lokasi stabil Secara teoritis



Gambar 3. Lokasi Penelitian (DAS Cisadane – Bogor – Jawa Barat) dan titik pengambilan sampel

Pengambilan cuplikan di lokasi pembandingan menggunakan alat *scraper* dengan ukuran (20x50) cm hingga kedalaman 20 cm dengan interval setiap lapisan 2 cm, kemudian dilanjutkan menggunakan *coring* ($d_i = 7$ cm) hingga kedalam 30 cm dengan interval lapisan 10 cm.

b. Perlakuan Pendahuluan cuplikan

Cuplikan-cuplikan tanah dibawa ke laboratorium sedimentologi – PAIR – BATAN, kemudian dilakukan perlakuan pendahuluan sebelum kandungan ^{210}Pb nya dianalisis.

Lokasi penelitian yang dipilih adalah Daerah Aliran Sungai (DAS) Cisadane – BOGOR-JAWA BARAT.

METODE

a. Pengambilan cuplikan

Empat lokasi stabil yang dipilih yaitu Hutan Primer Gn.Salak di Cijeruk (ketinggian 1242 m dpl), Perkebunan Teh – Cipelang – Cijeruk (ketinggian 694 m dpl), Hutan Pinus – Pasir Jaya (ketinggian 855 m dpl) dan Perkebunan Karet – Rumpin (ketinggian 230 m dpl) (Gambar 3).

Perlakuan pendahuluan cuplikan terdiri dari : pengeringan cuplikan tanah, penimbangan berat kering total cuplikan, pengayakan hingga lolos ayakan 1 mm dan penggerusan untuk cuplikan yang tidak lolos ayakan 1 mm.

c. Analisis kandungan ^{210}Pb

Sebanyak 400 g dari cuplikan tanah kering dan halus dimasukkan ke dalam merinelli, ditutup dengan baik, kemudian disegel menggunakan selotip kertas selama 21 hari. Hal ini dilakukan untuk meyakinkan bahwa kesetimbangan antara ^{226}Ra dan anak luruhnya

^{222}Rn sudah terjadi. Kandungan ^{210}Pb dalam cuplikan tanah selanjutnya dianalisis menggunakan detektor *High Purity Germanium* (HPGe) dengan efisiensi 30 % yang dihubungkan ke GENIE 2000 *spectrum master* dan *multi channel analyzer* (MCA). Pengukuran dilakukan selama minimum 80.000 detik, dan standar yang digunakan adalah standar sekunder yang telah diketahui aktivitas ^{210}Pb *excess* nya.

d. Analisis data

Aktivitas ^{210}Pb .

Aktivitas radioisotop alam ^{210}Pb total ditentukan pada energi 46,5 keV, dan aktivitas ^{214}Pb atau ^{210}Pb *supported* ditentukan pada energi 351,9 keV. Penentuan aktivitas dari ^{210}Pb *unsupported* atau *excess* akan didapat dengan cara melakukan pengurangan aktivitas ^{210}Pb *supported* terhadap ^{210}Pb total (10).

Konversi cacahan ke aktivitas radioisotop

Untuk penentuan faktor koreksi detektor digunakan standar tanah dengan aktivitas $^{210}\text{Pb}_{\text{excess}}$ yang telah diketahui (standar sekunder). Koreksi aktivitas $^{210}\text{Pb}_{\text{excess}}$ sesungguhnya untuk standar sekunder terhadap aktivitas pada saat ini menggunakan persamaan :

$$A = A_o \cdot e^{-kt} \quad (\text{i})$$

Dimana :

A_o = Aktivitas standar pada Desember 2006

A = Aktivitas standar saat ini

k = konstanta

t = Lamanya peluruhan

Hasil pengukuran aktivitas standar menggunakan MCA kemudian dibandingkan terhadap aktivitas sesungguhnya pada waktu yang sama. Persamaan yang digunakan adalah :

$$\text{c.f.} = A_{\text{so}}/A_{\text{ao}} \quad (\text{ii})$$

dimana :

c.f. = Factor koreksi

A_{ao} = Aktivitas yang diperoleh dari alat

A_{so} = Aktivitas yang sebenarnya

Faktor koreksi kemudian akan digunakan untuk mengkoreksi aktivitas $^{210}\text{Pb}_{\text{excess}}$ yang diperoleh melalui pengukuran. Persamaan yang digunakan adalah :

$$A_s = \text{c.f} \times (A_a/W) \quad (\text{iii})$$

Dimana :

A_s = Aktivitas $^{210}\text{Pb}_{\text{excess}}$ sampel yang terkoreksi (Bq/kg)

A_a = Aktivitas $^{210}\text{Pb}_{\text{excess}}$ sampel yang didapat dari alat (Bq)

W = Berat sampel yang dianalisis (kg)

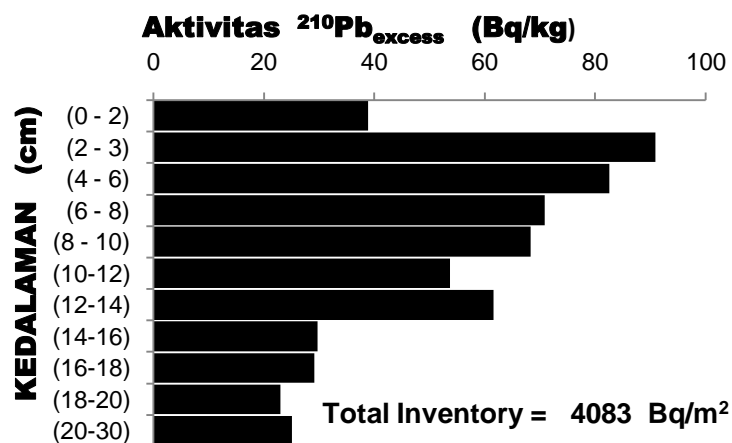
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengambilan cuplikan di lokasi pembanding dilakukan pada lokasi yang datar dan terbuka. Lokasi-lokasi pembanding yang dipilih adalah Hutan Lindung Gn.Salak (ketinggian 1242 m dpl), Perkebunan teh (ketinggian 694 m dpl), Hutan Pinus (ketinggian 855 m dpl) dan Perkebunan Karet (ketinggian 230 m dpl). Alat yang digunakan untuk pengambilan cuplikan adalah *scraper* (20 x 50) cm dengan ketebalan setiap lapisan adalah 2 cm hingga kedalaman 20 cm, kemudian dilanjutkan dengan *coring* ($d_i = 7$ cm) hingga kedalaman 30 cm dengan ketebalan lapisan 10 cm. Hasil perhitungan dan profil distribusi $^{210}\text{Pb}_{\text{excess}}$ di lokasi pembanding dapat dilihat pada Gambar 4 sampai dengan Gambar 7 dibawah ini.

Lokasi pembanding yang pertama adalah Hutan primer di Gn Salak, dan pengambilan cuplikan dilakukan pada tempat yang datar. Pengambilan cuplikan untuk profil distribusi dilakukan pada satu titik menggunakan alat *scraper* (luas permukaan alat 0,1 m²), sedangkan untuk penentuan nilai total inventori dilakukan pengambilan cuplikan sebanyak 7 titik menggunakan alat *coring* (luas permukaan alat 0,00385 m²) dengan kedalaman 20 cm. Nilai inventori $^{210}\text{Pb}_{\text{excess}}$ untuk titik-titik pengambilan cuplikan dapat dilihat pada Tabel 1. Pada tabel 1 terlihat bahwa konsentrasi (Bq/kg) dan inventori (Bq/m²) titik-titik percobaan bervariasi cukup signifikan. Hal ini disebabkan karena tumbuhan pada hutan lindung ini telah menghalangi jatuhnya dari $^{210}\text{Pb}_{\text{excess}}$ sehingga keberadaan radioisotop tersebut di permukaan tanah tidak homogen. Sedangkan profil distribusi dari $^{210}\text{Pb}_{\text{excess}}$ di lapisan tanah dapat dilihat pada Gambar 4.

Tabel 1. Aktivitas (Bq/kg) dan inventori (Bq/m²) ²¹⁰Pb_{ex} di lokasi pembanding Hutan primer - Gn. Salak - Cijeruk

No.	Profil distribusi		INVENTORI		
	Kedalaman (cm)	(Bq/kg)	KODE	(Bq/kg)	(Bq./m ²)
1.	(0 – 2)	38,95	Scrapper (0-20)cm	549,27	4796,40
2.	(2 – 4)	90,99	COR 1	55,38	4113,75
3.	(4 – 6)	82,61	COR 2	66,58	5395,77
4.	(6 – 8)	70,93	COR 3	63,75	5779,13
5.	(8 – 10)	68,34	COR 4	24,09	3716,70
6.	(10 – 12)	53,81	COR 5	17,48	2269,84
7.	(12 – 14)	61,67	COR 6	47,82	4409,52
8.	(14 – 16)	29,76	COR 7	14,31	2186,07
9.	(16 - 18)	29,15			
10.	(18 – 20)	23,07	RERATA		4083 ± 1322
11.	(20 – 30)	25,18			

Gambar 4. Profil distribusi ²¹⁰Pb_{excess} di lapisan tanah Hutan Primer Gn. Salak - Cijeruk

Aktivitas ²¹⁰Pb_{excess} untuk profil distribusi menggunakan satuan (Bq/kg) karena ketebalan setiap lapisan tidak semuanya 2 cm, tapi untuk lapisan terakhir 10 cm. Melalui gambar 4 terlihat bahwa konsentrasi tertinggi terdapat pada lapisan kedua ²¹⁰Pb_{ex}. Menurut teori, konsentrasi maksimum terdapat pada permukaan atas, pada lokasi ini profil distribusi vertikal ini menunjukkan bahwa konsentrasi maksimum terdapat pada lapisan kedua. Hal ini kemungkinan disebabkan karena pada lapisan pertama pada umumnya banyak mengandung humus (lapukan dari daun-daun) yang telah tercampur dengan tanah sedangkan radioisotop

alam ²¹⁰Pb_{excess} hanya melekat pada permukaan tanah (lempung khususnya), sedangkan lapisan dibawahnya hanya sedikit mengandung humus sehingga konsentrasi radioisotop ²¹⁰Pb_{excess} tinggi.

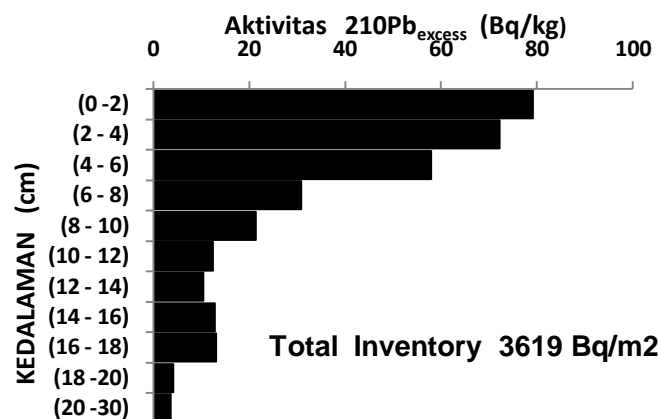
Lokasi pembanding kedua adalah Perkebunan teh yang kurang terawat, sehingga banyak ditumbuhi oleh ilalang dan tanaman perusak yang lain. Pengambilan cuplikan dilakukan di puncak lahan yang datar dan terbuka, dan hanya menggunakan alat scrapper. Hasil perhitungan aktivitas (Bq/kg) dan nilai inventori (Bq/m²) ²¹⁰Pb_{excess} dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Aktivitas (Bq/kg) dan inventori (Bq/m²) ²¹⁰Pb_{excess} di lokasi Pekebunan teh – Cipelang - Cijeruk

No.	Profil distribusi		INVENTORI		
	Kedalaman (cm)	(Bq/kg)	KODE	(Bq/kg)	(Bq./m ²)
1.	(0 – 2)	79,18	Scrapper (0-20)cm	314,35	3618,57
2.	(2 – 4)	72,24			
3.	(4 – 6)	57,96			
4.	(6 – 8)	30,85			
5.	(8 – 10)	21,37			
6.	(10 – 12)	12,37			
7.	(12 – 14)	10,40			
8.	(14 – 16)	12,79			
9.	(16 - 18)	13,03			
10.	(18 – 20)	4,16			
11.	(20 – 30)	3,61			

Pada lokasi ini tidak dilakukan pengambilan sampel menggunakan coring, karena tempat yang

datar tidak terlalu luas. Untuk profil distribusi dari ²¹⁰Pb_{excess} dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Profil distribusi ²¹⁰Pb_{ex} di lapisan tanah Perkebunan teh – Cipelang – Cijeruk

Melalui Gambar 5, dapat dilihat bahwa profil distribusi ²¹⁰Pb_{ex}, konsentrasi maksimum terdapat pada lapisan permukaan dan menurun dengan bertambahnya kedalaman, hal ini disebabkan karena jatuhnya dari radioisotop ²¹⁰Pb_{ex} terjadi terus menerus sampai sekarang sehingga walaupun lahan ini pernah mengalami pengolahan ketika perkebunan teh ini dibuat, jatuhnya akan membentuk profil distribusi vertikal yang baru dimana konsentrasi akan menurun secara eksponensial dengan bertambahnya kedalaman.

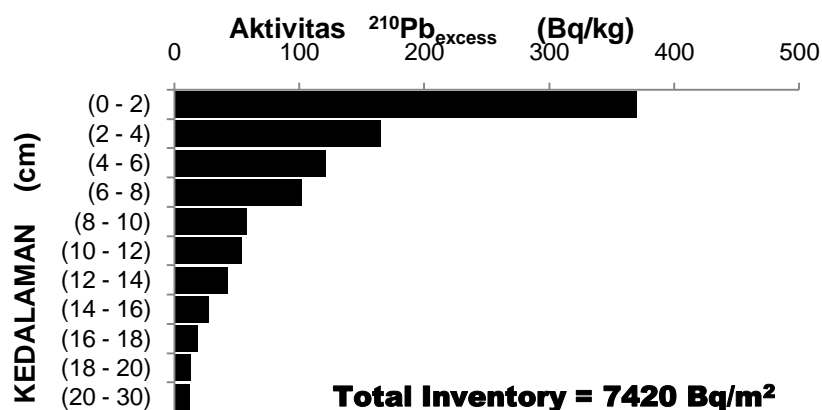
Lokasi pembanding ketiga adalah hutan pinus (ketinggian 855 m dpl), hutan ini merupakan Taman Nasional yang digunakan untuk perkemahan dan penangkaran burung elang. Pengambilan cuplikan dilakukan 1 titik menggunakan alat scrapper (luas permukaan alat 0,1 m²), dan 4 titik menggunakan alat coring (luas permukaan alat 0,00385 m²) dengan kedalaman 20 cm. Pengambilan cuplikan juga dilakukan pada tempat yang datar dan terbuka. Hasil perhitungan aktivitas (Bq/kg) dan inventori (Bq/m²) ²¹⁰Pb_{excess} dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Aktivitas (Bq/kg) dan inventori (Bq/m²) ²¹⁰Pb_{excess} di lokasi pembanding Hutan Pinus – Pasir Jaya

No.	Profil distribusi		INVENTORI		
	Kedalaman (cm)	(Bq/kg)	KODE	(Bq/kg)	(Bq./m ²)
1.	(0 – 2)	370,11	Scrapper (0-20)cm	972,08	6935,34
2.	(2 – 4)	165,08	COR 1	59,86	9527,78
3.	(4 – 6)	120,93	COR 2	44,07	6879,36
4.	(6 – 8)	102,20	COR 3	25,99	4316,56
5.	(8 – 10)	58,12	COR 4	55,10	9439,82
6.	(10 – 12)	53,63			
7.	(12 – 14)	42,45			
8.	(14 – 16)	27,66			
9.	(16 - 18)	18,87			
10.	(18 – 20)	13,02	RERATA		7420 ± 1933
11.	(20 – 30)	12,23			

Melalui Tabel 3, dapat dilihat bahwa konsentrasi (Bq/kg) dan inventori (Bq/m²) ²¹⁰Pb_{excess} tidak terlalu bervariasi, karena hutan pinus relatif lebih terbuka dibandingkan dengan hutan primer.

Profil distribusi ²¹⁰Pb_{excess} dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Profil distribusi ²¹⁰Pb_{excess} di lapisan tanah Hutan Pinus

Melalui Gambar 6, dapat dilihat bahwa pada profil distribusi ²¹⁰Pb_{ex} terdapat di lapisan teratas, hal ini disebabkan karena jatuhnya ²¹⁰Pb_{ex} yang terjadi sampai sekarang akan membentuk profil distribusi yang ideal.

Lokasi pembanding yang keempat adalah suatu perkebunan karet (ketinggian 230 m

dpl) yang luas dan datar, terletak di daerah rumpin. Pengambilan cuplikan dilakukan 1 titik menggunakan alat scrapper, dan 2 titik menggunakan alat coring dengan kedalaman 20 cm. Hasil perhitungan aktivitas (Bq/kg) dan inventori (Bq/m²) dari ²¹⁰Pb_{excess} dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Aktivitas (Bq/kg) dan inventori (Bq/m²) ²¹⁰Pb_{excess} di lokasi pembanding Perkebunan Karet - Rumpin

No.	Profil distribusi		INVENTORI		
	Kedalaman (cm)	(Bq/kg)	KODE	(Bq/kg)	(Bq/m ²)
1.	(0 - 2)	52,63	Scrapper (0-20)cm	265,93	3636,40
2.	(2 - 4)	61,22	COR 1	18,00	3407,44
3.	(4 - 6)	33,52	COR 2	21,52	3872,73
4.	(6 - 8)	24,75			
5.	(8 - 10)	15,89			
6.	(10 - 12)	22,24			
7.	(12 - 14)	14,13			
8.	(14 - 16)	15,53	RERATA		3606 ± 240
9.	(16 - 18)	14,37			
10.	(18 - 20)	11,66			
11.	(20 - 30)	0,00			

Melalui Tabel 4, dapat dilihat konsentrasi (Bq/kg) dan inventori (Bq/m²) untuk ²¹⁰Pb_{ex} titik-titik percobaan tidak bervariasi secara signifikan, karena perkebunan karet adalah suatu lokasi yang cukup terbuka dibandingkan dengan hutan primer. Untuk profil distribusi ²¹⁰Pb_{excess} dapat dilihat pada Gambar 7. Melalui Gambar 7, profil

distribusi ²¹⁰Pb_{excess} terlihat agak bervariasi pada beberapa kedalaman, hal ini disebabkan karena adanya pengolahan tanah. Pengolahan tanah terjadi ketika dilakukan penggantian tanaman karet. Aktivitas maksimum pada profil ini terdapat pada lapisan kedua (2 - 4) cm.



Gambar 7. Profil distribusi ²¹⁰Pb_{excess} (B) di lapisan tanah Perkebunan Karet – Rumpin

KESIMPULAN

Melalui hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa profil distribusi ²¹⁰Pb_{excess} di hutan pinus sesuai untuk dijadikan lokasi pembanding, sedangkan hutan primer Gn. Salak kurang baik karena jatuhnya radioisotop di lokasi cenderung terhalang oleh padatnya tanaman di lokasi ini. Perkebunan karet, walaupun telah mengalami pengolahan tetapi memiliki variasi inventori titik-titik percobaan yang tidak signifikan, sehingga dapat digunakan sebagai lokasi pembanding untuk DAS Cisadane bagian tengah. Jarak antara hutan pinus dan perkebunan karet cukup jauh sehingga hutan pinus hanya

sesuai sebagai lokasi pembanding untuk DAS Cisadane bagian hulu (atas). Berdasarkan pada nilai inventori ²¹⁰Pb_{excess} yang cukup tinggi dari lokasi-lokasi pembanding tersebut maka radioisotop alam ²¹⁰Pb dapat dimanfaatkan untuk studi erosi di daerah DAS Cisadane - Bogor.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini terlaksana atas dana dari Lembaga Non Departemen BATAN. Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kepala Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi, Kepala Bidang Industri dan Lingkungan serta rekan-rekan di

subkelompok Erosi/Sedimentasi sehingga penelitian ini dapat berjalan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

1. Yang, M.Y., Du, M., Zhao, Q., Minami, K., & Hatta, T., "Partitioning the contribution of sheet and rill erosion using Berllium-7 and Cesium-137", Soil Science American Journal, 70, 1579-1590 (2006).
2. Walling, D.E., and Quine, T.A., "The use of caesium-137 measurement in soil erosion surveys", In : Bogen, J., Walling, D.E., Day, T (Eds.), Erosion and sediment transport monitoring problem in river basins. IAHS Publ., vol.210, IAHS Press, Wallingford, 1992, 143 – 152.
3. Quine, T.A., Walling, D.E., and Mandaringana, Q.T., "An investigation of the Influence of edaphic, topographic and land use controls on soil erosion on Agricultural land in the Borrowdale and Chinamora areas, Zimbabwe, based on ¹³⁷Cs measurements", in: Hadley, R.F., Mizuyama, T. (Eds.), *Sediment Problems; Strategies for Monitoring, Prediction and Control*, IAHS Publ., vol 217, IAHS Press, Wallingford, 1993, 185-196
4. Collins, A.L., Walling, D.E., Sickingabula, H.M., and Leeks, G.J.L., "Using ¹³⁷Cs measurements to quantify soil erosion and redistribution rates for areas under different land use in the Upper Kaley River basin, southern Zambia", *Geoderma* 104, 2001, 229-323.
5. He, Q., and D.E. Walling, "The distribution of fallout ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb in Undisturbed and cultivated soils", *Appl. Radiat. Isotopes* 48, 1997, 677-690
6. Wallbrink, P.J., "Quantifying the distribution of soils and sediments within a post-harvested forest coupe near Bombala, New South Wales, Australia",
7. Rafiq, M., Ahmad, M., Iqbal, N., Tariq, J.A., Akram, W., and Shafiq, M., "Assessment of soil Losses from managed and unmanaged sites in a Sub Catchment of Rawal Dam, Pakistan in fallout radionuclides", In: *Impact of soil conservation measures on erosion control and soil quality*. IAEA-TECDOC-1665. pp. 73-85, (2011)
8. Walling, D.E., and He, Q., "Using Fallout Lead-210 Measurements to estimate soil erosion on cultivated land", *Soil Science Society of American Journal*, Vol. 63, No.5, Sept – Oct 1999, 1404 – 1412.
9. Rowan, J.S., Black, S., and Franks, S.W., "Sediment fingerprinting as an Environmental Forensics Tool Explaining Cyanobacteria Bloom in Lakes, *Applied Geology*, 32, 832- 843, 2012
10. Walling, D.E., Collin, A.L., and Sickingabula, H.M., "Using unsupported lead-210 measurements to investigate soil erosion and sediment delivery in a small Zambian catchment", *Geomorphology*, 52, Elsevier, 2003, 193 - 213.

Tanya Jawab

Penanya : Oktania Diah P.

Pertanyaan :

1. Prinsip dasar dari penelitian yang anda lakukan dan alat yang dipakai dalam penelitian apa ?

Jawaban :

1. Prinsip dasar penelitian ini adalah memanfaatkan radioisotop alam ²¹⁰P_{bex} yang terdapat di tanah untuk studi erosi. Lokasi pembanding digunakan untuk membandingkan lokasi penelitian. Jika nilai inventori di LP (lokasi pembanding) lebih besar dari lokasi penelitian berarti terjadi proses erosi (-), dan jika nilai inventori LP < dari nilai inventori lokasi penelitian berarti terjadi proses deposisi (+). Alat yang digunakan untuk analisis radioisotope alam adalah spektrometer gamma (MCA).

KARAKTERISTIK TAPAK POTENSIAL DISPOSAL LIMBAH RADIOAKTIF DAERAH SERANG BANTEN : Konsentrasi *Naturally Occuring Radioactive Materials (NORM)* dalam Batuan Andesit, Breksi dan Tanah

Sucipta, Risdiyana Setiawan, Dadang Suganda, Arimuladi Setyo Purnomo
Pusat Teknologi Limbah Radioaktif, BATAN
E-mail : scipta@batan.go.id

ABSTRAK

KARAKTERISTIK TAPAK POTENSIAL DISPOSAL LIMBAH RADIOAKTIF DAERAH SERANG BANTEN : Konsentrasi *Naturally Occuring Radioactive Materials (NORM)* dalam Batuan Andesit, Breksi dan Tanah. Telah dilakukan pengukuran radiasi *Naturally Occuring Radioactive Materials (NORM)* di lingkungan tapak potensial disposal limbah radioaktif daerah Serang Banten. Pengukuran konsentrasi NORM dilakukan untuk mengetahui rona awal konsentrasi NORM. Ruang lingkup kegiatan yang dilakukan meliputi pengukuran konsentrasi NORM, serta pengambilan contoh batuan dan atau tanah permukaan. Radionuklida yang diukur konsentrasinya meliputi Cs-137 (bukan NORM) dan K-40, Ra-226 dan Th-232 (NORM). Survey atau pengukuran radiasi NORM menggunakan alat *Gamma Spectrometry Portable* dan *Global Positioning System (GPS)*. Wilayah kerja pengukuran meliputi SRG-1, SRG-2, SRG-3 dan SRG-5 yang termasuk dalam wilayah tapak potensial berbatuan andesit dan breksi vokanik, serta SRG-4 yang mewakili tanah dan penggunaan lahan sawah. Dari hasil pengukuran diperoleh data bahwa 5 lokasi pengukuran memiliki konsentrasi NORM bernilai latar (*background*). Konsentrasi NORM pada ke 5 titik pengukuran tersebut masih jauh di bawah ambang batas maksimum yang diijinkan berdasarkan Peraturan Kepala (Perka) Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPATEN) dan rekomendasi Badan Tenaga Nuklir Internasional (IAEA).

Kata Kunci : NORM, tapak, disposal, limbah radioaktif.

ABSTRACT

CHARACTERISTIC OF THE POTENTIAL SITE FOR RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL IN SERANG BANTEN : Concentration of Naturally Occuring Radioactive Materials (NORM) in the Andesite, Breccia and Soil. NORM radiation measurement of potential site for radioactive waste disposal at Serang Banten has been carried out. NORM measurements conducted to determine the baseline concentration of NORM. Scope of work performed includes measurements the concentration of NORM, as well as rock and surface soil sampling. NORM radionuclides concentration measured include Cs-137 (non NORM) and K-40, Ra-226, Th-232 (NORM). The NORM measurements performed with a Portable Gamma Spectrometry and Global Positioning System (GPS). The work area includes of SRG-1, SRG-2, SRG-3 and SRG-5 that are located in the andesitic and breccias rock of potential site for radioactive waste disposal. SRG-4 located on land farming with surface soil. The measurement results is, all location have NORM concentration that are worth the background. The concentration of NORM in all measurement points is still far below the maximum allowable under the Decree of BAPATEN Chairman and the International Atomic Energy Agency (IAEA) recommendation.

Keywords : NORM, disposal site, radioactive waste.

PENDAHULUAN

Pada tahun 2010 telah dilaksanakan kegiatan seleksi tapak potensial untuk disposal limbah radioaktif berdasarkan aspek-aspek geomorfologi, litostratigrafi, seismotektonik, vulkanologi, hidrologi, hidrogeologi, cebakan tambang, demografi, kawasan penting dan situs bersejarah^[1]. Wilayah-wilayah potensial telah dipilih untuk dilakukan studi, yang meliputi Serang, Serpong, Karawang, Subang, Sumedang, Jepara, Rembang dan Tuban. Dari evaluasi

terhadap wilayah-wilayah potensial tersebut telah diperoleh 10 (sepuluh) tapak potensial yaitu Ujungjaya (Sumedang), Kramatronggeng - Cilame (Karawang), Kragan (Rembang), Bancar (Tuban), Puloampel (Serang), Jatirogo (Tuban), Buahdua (Sumedang), Bojonegara (Serang), G. Pusu (Jepara) dan Serpong.

Untuk melengkapi data karakteristik tapak potensial tersebut maka pada tahun 2016 dilakukan pengukuran konsentrasi *Naturally Occurring*

Radioactive Materials (NORM) dan Cs-137. Menurut Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 33 Tahun 2007^[2], *NORM* adalah zat radioaktif yang secara alami terdapat di alam. Untuk mengetahui rona awal lingkungan dari aspek konsentrasi *NORM* dalam batuan dan tanah dalam wilayah tapak potensial disposal limbah radioaktif perlu dilakukan pengukuran konsentrasi *NORM*. Data rona awal lingkungan dari aspek konsentrasi *NORM* perlu diketahui dalam rangka penyusunan Analisis Mengenai Dampak Lingkungan (AMDAL). Pembangunan dan pengoperasian disposal limbah radioaktif dalam suatu lokasi termasuk dalam jenis rencana usaha dan atau kegiatan yang wajib memiliki AMDAL^[3], karena dalam pengoperasian disposal limbah radioaktif diperkirakan akan menimbulkan dampak fisik-kimia berupa pencemaran terhadap air dan tanah.

Konsentrasi *NORM* dalam bahan alamiah umumnya 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^[4].

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.

Dalam *Basic Safety Standard* yang dikeluarkan oleh Badan Tenaga Atom Internasional (*International Atomic Energy Agency = IAEA*)^[4] disebutkan bahwa 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^[5], 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.

Daerah penelitian didominasi oleh wilayah penambangan batuan beku andesit sebagai bahan bangunan, sehingga perlu pula ditinjau tentang keselamatan penggunaan bahan bangunan tersebut dari sisi konsentrasi *NORM*. Pengukuran *NORM* dalam bahan bangunan pernah dilakukan di Azerbaijan^[6]. Dalam *Standard of Radioactive Safety (SRS) 76/87* ditentukan bahwa konsentrasi efektif (C_{ef}) *NORM* dalam bahan bangunan tidak boleh lebih dari 370 Bq/kg. Di Swedia pernah dilakukan penyelidikan aktivitas *NORM* dalam berbagai lapangan maupun daerah kerja untuk tujuan keselamatan, sehingga ditemukan beberapa lokasi yang perlu dilakukan penyelidikan lebih lanjut seperti dalam abu batubara dan saringan dari pengolahan air minum^[7]. Pernah dilakukan pengkajian terkait *state of the art* pada studi tentang lingkungan yang memiliki kandungan *NORM* relatif tinggi^[8]. Pengukuran radiasi dan konsentrasi *NORM* pada lahan calon tapak PLTU batubara di daerah Kramatwatu Serang Banten juga pernah dilakukan dalam rangka untuk mengetahui rona awal konsentrasi *NORM/TENORM* yang akan dituangkan dalam dokumen AMDAL^[9]. Studi potensi peningkatan paparan unsur radioaktif alam akibat pembakaran batubara pernah dilakukan juga^[10], serta pengukuran tingkat radioaktivitas radionuklida primordial ²³⁸U dan ²³²Th di lingkungan tambang batubara terbuka^[11].

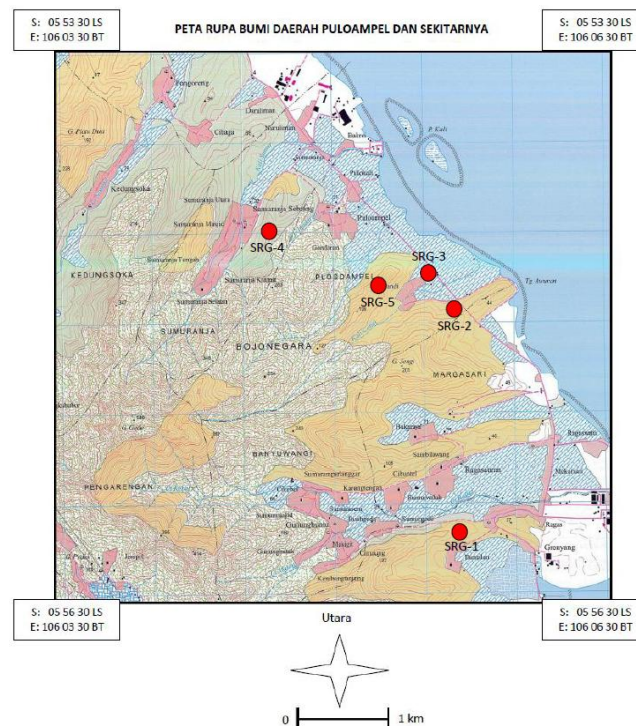
Tujuan dari pengukuran radiasi dan konsentrasi *NORM* adalah untuk mengetahui rona awal konsentrasi *NORM*

sebelum wilayah tersebut digunakan untuk kegiatan tertentu. Lingkup pekerjaan yang dilakukan meliputi pengukuran konsentrasi *NORM*, serta pengambilan contoh batuan dan tanah permukaan. Radionuklida yang diukur konsentrasinya meliputi K-40, Ra-226 Th-232 (*NORM*) dan Cs-137 (bukan *NORM*).

METODOLOGI

Pengukuran *NORM* dilakukan pada wilayah tapak potensial di daerah Puloampel, Kabupaten Serang, Propinsi Banten, pada tanggal 22-24 Nopember 2016, seperti ditunjukkan dalam Gambar 1.

Perlengkapan yang digunakan dalam pengukuran konsentrasi *NORM* adalah *Gamma Spectrometer Portable (GSP Atomtec) AT6101DR*, *Global Positioning System (GPS)*, *soil sampler*, *plastic bag*, *APD*, *TLD*, palu geologi, kompas geologi, peta lokasi, kamera digital, *Personal Computer*.



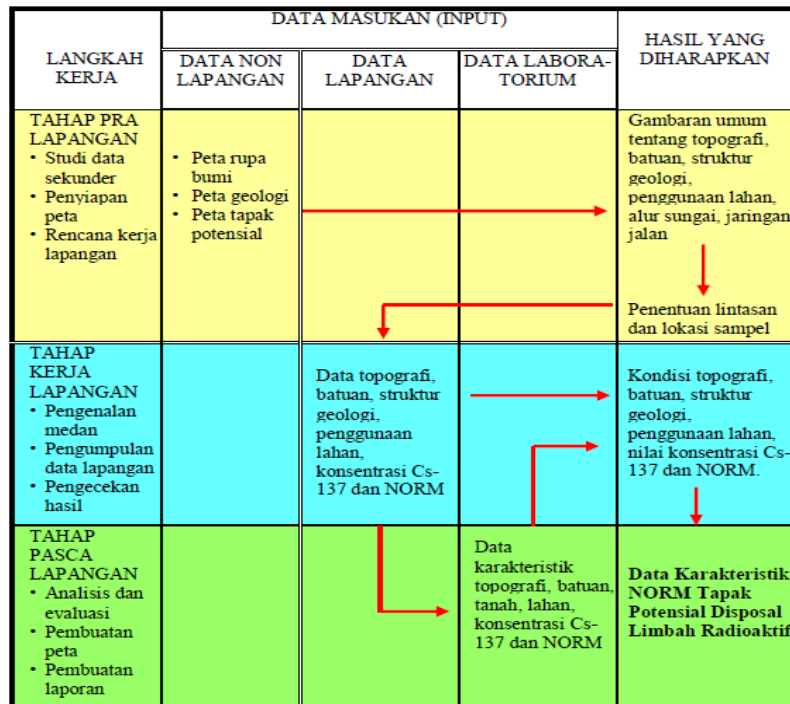
Gambar 1. Lokasi pengukuran *NORM*

Karakterisasi *NORM* dilakukan dengan langkah-langkah kegiatan pra-lapangan, lapangan dan pasca-lapangan, seperti ditunjukkan dalam Gambar 2. Khusus untuk kegiatan lapangan dengan urutan sebagai berikut :

1. Pengamatan kondisi lingkungan;
2. Penentuan lokasi pengukuran, dengan memilih batuan, 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;
5. Pengukuran dengan *GSP Atomtec* dilakukan sebanyak 3 sampai 5 kali pengulangan dengan interval waktu 3-5 menit;
6. Pembacaan dan pencatatan hasil pengukuran pada buku catatan lapangan;

7. *Setting off* alat ukur;
8. Pengambilan contoh batuan dan tanah sebanyak lebih kurang 2 kg;
9. Pewadahan dan pemberian label contoh batuan dan tanah dalam kantong plastik sampel;
10. 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 2. Diagram alir kegiatan karakterisasi NORM tapak potensial

HASIL DAN PEMBAHASAN

Daerah penelitian Serang termasuk dalam wilayah Karang-Merak yang merupakan bekas tubuh gunungapi Karang dan Gede. Daerah Serang (Bojonegara dan Puloampel) merupakan daerah dataran bergelombang dan perbukitan rendah-tinggi dengan lereng landai-terjal. Kondisi proses geomorfologi permukaan seperti erosi dan gerakan tanah relatif tidak intensif, karena kondisi penyusun batuan yang berupa batuan beku andesit dan breksi vulkanik yang relatif kompak dan keras. Secara morfogenesis daerah penelitian merupakan daerah yang terbentuk oleh aktivitas vulkanik. Oleh karena itu daerah penelitian dapat diklasifikasikan sebagai satuan perbukitan lereng gunungapi^[9].

Batuan yang tersingkap di daerah penelitian meliputi (urut dari tua ke muda) hasil gunungapi Gede, tufa Banten, batugamping koral dan endapan aluvium^[10]. Hasil gunungapi Gede berupa lava, lahar dan breksi termampatkan, yang berumur Plistosen. Tufa Banten terdiri dari tufa, tufa batuapung dan batupasir tufaan, yang berumur sedikit lebih muda daripada hasil gunungapi Gede. Stratigrafi daerah penelitian yang hanya terdiri dari dua satuan batuan dapat disimpulkan relatif sederhana. Batuan yang dapat dipilih sebagai batuan potensial adalah batuan beku andesit dari hasil gunungapi Gede. Ketebalan batuan tersebut diduga mencapai lebih dari 500 m, dengan luas pelamparan mencapai 10x10 km².

Penggunaan lahan daerah pengukuran NORM dan sekitarnya berupa

tambang batu, semak, hutan, kebun dan sawah (Gambar 3). 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, 4 dan 5.

Data hasil pengukuran konsentrasi Cs-137 dan NORM dari lokasi SRG-01 ditunjukkan pada Tabel 1. Dari tabel tersebut dapat diketahui bahwa konsentrasi

Cs-137 adalah 0 Bq/kg, K-40 berkisar antara 231,4 sampai dengan 378,8 dengan rata-rata sebesar 319,6 Bq/kg. Konsentrasi Ra-226 dalam tanah di lokasi SRG-1 berkisar antara 7,7 – 8,8 Bq/kg, dengan rata-rata sebesar 8,33 Bq/kg. Konsentrasi Th-232 berkisar antara 15,2 – 32,6 Bq/kg dan rata-rata sebesar 25,0 Bq/kg. Konsentrasi efektif NORM berkisar antara $48,4 \pm 6,9$ Bq/kg sampai dengan $73,5 \pm 18,7$ Bq/kg dengan rata-rata sebesar $63,5 \pm 14,1$ Bq/kg.



Lokasi SRG-1



Lokasi SRG-2



Lokasi SRG-3



Lokasi SRG-4



Lokasi SRG-5a



Lokasi SRG-5b

Gambar 3. Lokasi pengukuran NORM yang berupa dataran bergelombang dengan penggunaan lahan tambang andesit (lokasi SRG-1), tambang batu (lokasi SRG-2), tambang andesit (lokasi SRG-3), sawah (lokasi SRG-4 dan semak, tegal, kebun dan hutan (lokasi SRG-5).

Tabel 1. Hasil pengukuran konsentrasi Cs-137 dan NORM lokasi SRG-01-2016, Ragas Grenyang, koordinat lokasi S : 05° 56' 10.0" E : 106° 06' 03.9"

No	Batuan dan penggunaan lahan	Elevasi (m)	Konsentrasi Aktivitas (Bq/kg)				Konsentrasi Efektif NORM (Bq/kg)
			Cs-137	K-40	Ra-226	Th-232	
1	Andesit, tambang batu andesit	38	0	231,4	8,8	15,2	48,4±6,9
2	Andesit, tambang batu andesit	38	0	378,8	8,5	27,2	68,7±16,7
3	Andesit, tambang batu andesit	38	0	348,6	7,7	32,6	73,5±18,7
		Rata-rata	0	319,6	8,33	25,0	63,5±14,1

Tabel 2. Hasil pengukuran konsentrasi Cs-137 dan NORM lokasi SRG-02-2016, koordinat lokasi S : 05° 54' 47.5" E : 106° 05' 58.3"

No	Batuan dan penggunaan lahan	Elevasi (m)	Konsentrasi Aktivitas (Bq/kg)				Konsentrasi Efektif NORM (Bq/kg)
			Cs-137	K-40	Ra-226	Th-232	
1	Breksi vulkanik, tambang batu	30	0	186,0	6,9	18,0	44,6 ± 6,2
2	Breksi vulkanik, tambang batu	30	0	177,0	7,5	16,8	43,3 ± 8,8
3	Breksi vulkanik, tambang batu	30	0	186,3	5,7	17,6	---
		Rata-rata	0	183,1	6,7	17,5	43,95 ± 7,5

Data hasil pengukuran konsentrasi Cs-137 dan NORM dari lokasi SRG-02 dapat dilihat pada Tabel 2. Dari tabel tersebut dapat diketahui bahwa konsentrasi Cs-137 adalah 0 Bq/kg, konsentrasi K-40 berkisar antara 177,0 Bq/kg sampai dengan 186,3 Bq/kg, dengan rata-rata sebesar 183,1 Bq/kg. Konsentrasi Ra-226 dalam tanah di

lokasi SRG-2 berkisar antara 5,7– 7,5 Bq/kg, dengan rata-rata sebesar 6,7 Bq/kg. Konsentrasi Th-232 berkisar antara 16,8 sampai dengan 18,0 Bq/kg dan rata-rata sebesar 17,5 Bq/kg. Konsentrasi efektif NORM berkisar antara 43,3 ± 8,8 Bq/kg sampai dengan 44,6 ± 6,2 Bq/kg dengan rata-rata sebesar 43,95 ± 7,5 Bq/kg

Tabel 3. Hasil pengukuran konsentrasi Cs-137 dan NORM lokasi SRG-03-2016, Sumuranja, koordinat lokasi S : 05° 54' 17.2" E : 106° 04' 42.9"

No	Batuan dan penggunaan lahan	Elevasi (m)	Konsentrasi Aktivitas (Bq/kg)				Konsentrasi Efektif NORM (Bq/kg)
			Cs-137	K-40	Ra-226	Th-232	
1	Andesit, tambang batu andesit	30	0	241,7	6,2	15,0	46,4 ± 7,0
2	Andesit, tambang batu andesit	30	0	243,8	7,1	13,4	---
3	Andesit, tambang batu andesit	30	0	199,0	7,1	18,0	45,5 ± 6,5
		Rata-rata	0	228,7	6,8	15,5	46,0 ± 6,8

Hasil pengukuran konsentrasi Cs-137 dan NORM dari lokasi SRG-03 seperti ditunjukkan pada Tabel 3. Dari tabel tersebut dapat diketahui bahwa konsentrasi Cs-137 adalah 0 Bq/kg, konsentrasi K-40

berkisar antara 199,0 Bq/kg sampai dengan 243,8 Bq/kg, dengan rata-rata sebesar 228,7 Bq/kg. Konsentrasi Ra-226 dalam tanah di lokasi SRG-3 berkisar antara 6,2 – 7,1 Bq/kg, dengan rata-rata sebesar 6,8 Bq/kg.

Konsentrasi Th-232 berkisar antara 13,4 – 45,5 ± 6,5 Bq/kg sampai dengan 46,4 ± 7,0 Bq/kg dengan rata-rata sebesar 15,5 Bq/kg. Konsentrasi efektif NORM berkisar antara 18,0 Bq/kg dan rata-rata sebesar 15,5 Bq/kg. Konsentrasi efektif NORM berkisar antara 45,5 ± 6,5 Bq/kg sampai dengan 46,4 ± 7,0 Bq/kg dengan rata-rata sebesar 46,0 ± 6,8 Bq/kg.

Tabel 4. Hasil pengukuran konsentrasi Cs-137 dan NORM lokasi SRG-04-2016, Candi, koordinat lokasi S : 05° 54' 22.4" E : 106° 05' 11.7"

No	Batuan dan penggunaan lahan	Elevasi (m)	Konsentrasi Aktivitas (Bq/kg)				Konsentrasi Efektif NORM (Bq/kg)
			Cs-137	K-40	Ra-226	Th-232	
1	Tanah alluvial, sawah kering	16	10,1	45,6	5,2	17,2	31,7 ± 6,0
2	Tanah alluvial, sawah agak basah	16	13,0	38,6	5,1	15,2	27,9 ± 7,4
3	Tanah alluvial, sawah gembur	16	11,1	55,3	6,3	14,1	29,0 ± 4,5
		Rata-rata	11,4	46,5	5,5	15,5	29,5 ± 6,0

Hasil pengukuran konsentrasi Cs-137 dan NORM dari lokasi SRG-04 seperti ditunjukkan pada Tabel 4. Dari tabel tersebut dapat diketahui bahwa konsentrasi Cs-137 antara 10,1 - 13,0 Bq/kg dengan rata-rata 11,4 Bq/kg. Konsentrasi K-40 berkisar antara 38,6 sampai dengan 55,3 Bq/kg, dengan rata-rata sebesar 46,5 Bq/kg.

Konsentrasi Ra-226 dalam tanah di lokasi SRG-4 berkisar antara 5,1 – 6,3 Bq/kg, dengan rata-rata sebesar 5,5 Bq/kg. Konsentrasi Th-232 berkisar antara 14,1 – 17,2 Bq/kg dan rata-rata sebesar 15,5 Bq/kg. Konsentrasi efektif NORM berkisar antara 27,9 ± 7,4 sampai dengan 31,7 ± 6,0 Bq/kg dengan rata-rata sebesar 29,5 ± 6,0 Bq/kg.

Tabel 5. Hasil Pengukuran dosis radiasi dan konsentrasi NORM lokasi SRG-05-2016, bukit Utara Candi, koordinat lokasi S : 05° 54' 46.3" E : 106° 05' 23.2"

No	Batuan dan penggunaan lahan	Elevasi (m)	Konsentrasi Aktivitas (Bq/kg)				Konsentrasi Efektif NORM (Bq/kg)
			Cs-137	K-40	Ra-226	Th-232	
1	Tanah residual, tegalan dan kebun	33	24,8	58,4	5,2	28,0	46,8 ± 14,3
2	Breksi vulkanik, semak alang-alang	55	8,4	151,4	10,8	21,5	51,9 ± 8,5
3	Breksi vulkanik, semak dan hutan	87	9,0	163,0	7,8	20,3	47,5 ± 8,3
4	Breksi vulkanik, rumput dan semak	100	0	21,4	8,9	16,0	48,1 ± 8,6
		Rata-rata	10,6	98,6	8,2	21,5	48,6 ± 9,9

Hasil pengukuran konsentrasi Cs-137 dan NORM dari lokasi SRG-05 seperti ditunjukkan pada Tabel 5. Dari tabel tersebut dapat diketahui bahwa konsentrasi Cs-137 antara 0 - 24,8 Bq/kg. Konsentrasi K-40 berkisar antara 21,4 sampai dengan 163,0 Bq/kg, dengan rata-rata sebesar 98,6 Bq/kg. Konsentrasi Ra-226 dalam tanah di lokasi SRG-5 berkisar antara 5,2 – 10,8 Bq/kg, dengan rata-rata sebesar 8,2 Bq/kg. Konsentrasi Th-232 berkisar antara 16,0 – 28,0 Bq/kg dan rata-rata sebesar 21,5 Bq/kg. Konsentrasi efektif NORM berkisar antara

46,8 ± 14,3 sampai dengan 31,7 ± 6,0 Bq/kg dengan rata-rata sebesar 51,9 ± 8,5 Bq/kg.

Ada fenomena menarik yang didapat dari hasil pengukuran konsentrasi NORM dan bukan NORM di lima lokasi tersebut, yaitu bahwa :

1. K-40 ditemukan memiliki nilai konsentrasi tertinggi di semua titik pengukuran, Th-232 memiliki nilai konsentrasi menengah, dan Ra-226 memiliki nilai konsentrasi terendah.
2. Nilai konsentrasi NORM tertinggi terdapat pada batuan andesit, disusul

- batuan breksi dan terendah terdapat pada tanah.
3. Nilai rata-rata konsentrasi efektif NORM berkisar antara $29,5 \pm 6,0$ Bq/kg (SRG-4) hingga $63,5 \pm 14,1$ Bq/kg (SRG-1). Nilai konsentrasi efektif tersebut masih jauh dari ambang batas tertinggi yang termasuk kategori aman yaitu 370 Bq/kg^[6].
 4. Lokasi pengukuran pada batuan dasar (*bedrock*) andesit dan breksi tidak ditemukan konsentrasi radionuklida Cs-137 (bukan NORM).
 5. Radionuklida Cs-137 hanya ditemukan pada lokasi pengukuran yang berupa tanah atau lahan yang sudah mengalami pengolahan atau ada unsur intervensi manusia seperti lahan sawah, tegalan dan kebun (SRG-4 dan sebagian SRG-5).
 6. Semakin tinggi lokasi pengukuran, nilai konsentrasi Cs-137 semakin rendah (lokasi SRG-5).

KESIMPULAN

Nilai konsentrasi NORM tertinggi terdapat pada batuan andesit, disusul batuan breksi dan terendah terdapat pada tanah. K-40 ditemukan memiliki nilai konsentrasi tertinggi di semua titik pengukuran, Th-232 memiliki nilai konsentrasi menengah, dan Ra-226 memiliki nilai konsentrasi terendah.

Dilihat dari nilai rata-rata konsentrasi K-40, Ra-226 dan Th-232 menunjukkan nilai 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.

Nilai rata-rata konsentrasi efektif NORM berkisar antara $29,5 \pm 6,0$ Bq/kg hingga $63,5 \pm 14,1$ Bq/kg, masih jauh dari ambang batas tertinggi yang termasuk kategori aman yaitu 370 Bq/kg.

Kecenderungan konsentrasi K-40, Ra-226 dan Th-232 dalam batuan dan tanah di lokasi pengukuran wilayah tapak potensial (lokasi SRG-1, SRG-2, SRG-3, SRG-4 dan SRG-5) menurut ketentuan peraturan perundangan masih relatif jauh di bawah ambang batas dan menunjukkan nilai rona lingkungan yang bersifat latar (*background*).

Radionuklida Cs-137 (bukan NORM) hanya ditemukan pada lokasi pengukuran yang berupa tanah atau lahan yang sudah mengalami pengolahan atau ada unsur intervensi manusia seperti lahan sawah, tegalan dan kebun.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kami sampaikan kepada pimpinan PTLR atas dukungan kebijakan dan pendanaannya, pemerintah daerah setempat atas izinnya untuk berlangsungnya *survey* ini. Ucapan terima kasih juga kami sampaikan kepada bapak Marwoto atas bantuan surveinya.

DAFTAR PUSTAKA

1. SUCIPTA, BUDI S., DADANG S., HERU S. DAN A.S. PURNOMO, Evaluasi Tapak Potensial untuk Penentuan Tapak Terpilih Disposasi Limbah Radioaktif di Pulau Jawa, Prosiding SNTPL VIII, PTLR BATAN, Serpong, 2011.
2. PERATURAN PEMERINTAH RI No. 33 Tahun 2007 tentang Keselamatan Radiasi Pengion dan Keamanan Sumber Radioaktif.
3. 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.
4. KATHREN, R.L., NORM Sources and Their Origins, *Appl. Radiat. Isot.*, Vol. 49 No. 3, Elsevier Science Limited, 1998.
5. Peraturan Kepala Bapeten No. 9 Tahun 2009 tentang Intervensi terhadap Paparan yang Berasal dari *Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Material*.
6. ALIYEV, C., NORM in building materials, Proc. of NORM IV International Conference, Szczyrk, Poland, 2004, p. 256-266.
7. SODERMAN, A.L., BREWITZ, E. and H. MORE, Investigation of NORM Activities in Sweden, Proc. of the 5th International Symposium on NORM, Univ. of Seville – IAEA - Spanish Nuclear Safety Council & Univ. of Huelva, Seville, 2007, p. 393-398.
8. 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.
9. HENI, Studi Potensi Peningkatan Paparan Unsur Radioaktif Alam Akibat Pembakaran Batubara, Jurnal Pengembangan Energi Nuklir,

- BATAN, Vol. 7 No. 2 Desember (2005).
10. SUCIPTA, RISDIYANA, S., A.S. PURNOMO, Pengukuran Radiasi dan Konsentrasi *Naturally Occuring Radioactive Materials (NORM)* pada Lahan Calon Tapak PLTU Batubara Kramatwatu Serang Banten, Prosiding SNTPL XIV, PTLR BATAN – Universitas Indonesia, Jakarta, 2016, p. 155-164.
 11. 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).
 12. RUSMANA, E., SUWITODIRDJO, K. dan SUHARSONO, Peta Geologi Lembar Serang, P3G ESDM, Bandung, 1991.

PEMANTAUAN RADIOAKTIVITAS DI SEKITAR REAKTOR TRIGA 2000 BANDUNG

Juni Chussetijowati

Pusat Sains Dan Teknologi Nuklir Terapan, Jl. Tamansari 71 Bandung Jawa Barat 40132

Email : junic@batan.go.id

ABSTRAK

PEMANTAUAN RADIOAKTIVITAS DI SEKITAR REAKTOR TRIGA 2000 BANDUNG. Pemantauan radioaktivitas di sekitar reaktor TRIGA 2000 Bandung telah dilakukan. Pemantauan bertujuan untuk memperoleh data radioaktivitas dalam tanaman rumput dan tanah yang berada di sekitar reaktor TRIGA 2000 Bandung. Data yang diperoleh digunakan sebagai *baseline* data dan evaluasi radioaktivitas spesifik tapak reaktor TRIGA 2000 Bandung. Pemantauan dilakukan setiap bulan, di tahun 2016, dengan cara mengambil sampel rumput dan tanah di beberapa lokasi sekitar reaktor TRIGA 2000 Bandung. Selanjutnya sampel rumput dicuci, ditiriskan, dan diabukan. Sementara itu, sampel tanah dibersihkan dari pengotor yang tidak diinginkan, dikeringkan, dihaluskan dan diayak menggunakan ayakan ukuran 200 *mesh*. Masing-masing sampel ditimbang sebanyak 1 g dan dilakukan pengukuran kuantitatif radioaktivitas gross Beta yang terkandung di dalam sampel menggunakan alat cacah Alpha-Beta. Evaluasi dilakukan terhadap data radioaktivitas yang diperoleh dengan melakukan uji homogenitas dan uji t. Dari hasil pemantauan, diperoleh nilai radioaktivitas gross Beta dalam rumput berkisar antara 1,47 – 4,40 Bq/g abu dengan rata-rata $2,80 \pm 0,51$ Bq/g abu; dalam tanah berkisar antara 0,10 – 0,18 Bq/g dengan rata-rata $0,13 \pm 0,01$ Bq/g. Belum ada nilai baku mutu radioaktivitas dalam rumput dan tanah yang diperbolehkan berada di lingkungan. Dengan melakukan uji homogenitas dan uji t terhadap data nilai radioaktivitas yang diperoleh, serta dengan menggunakan tingkat kepercayaan 95 % diperoleh hasil uji bahwa data hasil pemantauan radioaktivitas dalam rumput dan tanah pada beberapa lokasi dan waktu pemantauan adalah homogen serta tidak berbeda secara signifikan antara sebelum dan setelah reaktor beroperasi di tahun 2016.

Kata Kunci : reaktor TRIGA, pemantauan, radioaktivitas

ABSTRACT

MONITORING OF RADIOACTIVITY AROUND THE TRIGA 2000 REACTOR BANDUNG. Monitoring of radioactivity around the TRIGA 2000 reactor Bandung has been carried out. The monitoring objectives are to obtain data on radioactivity in the grass and soil around the TRIGA 2000 reactor Bandung. The data obtained were used for baseline data and evaluation of the specific radioactivity of TRIGA 2000 reactor Bandung. Monitoring is done monthly, in 2016, by taking samples of grass and soil in several locations around the TRIGA 2000 reactor Bandung. Furthermore the grass sample were washed, dried, and ashed. Meanwhile, the soil samples were cleaned of unwanted impurities, dried, mashed and sieved using a 200 mesh sieve. Each sample was weighed as much as 1 g and a quantitative measurement of gross Beta radioactivity contained in the samples using the Alpha-Beta counter. Evaluation was done on radioactivity data obtained by conducting homogeneity test and t test. The results of monitoring, obtained result of radioactivity gross Beta in grass ranged between 1.47 to 4.40 Bq/g of ash with an average of 2.80 ± 0.51 Bq/g ash; in the soils ranged between 0.10 to 0.18 Bq/g with an average of 0.13 ± 0.01 Bq/g. There is no standard value of radioactivity in the grass and soil that is allowed in the environment. By conducting homogeneity test and t test on data of radioactivity value obtained, by using 95% confidence level, it is obtained that the result data of radioactivity monitoring in the grass and soil at some location and time of monitoring is homogeneous and does not differ significantly between before and after reactor operate in 2016.

Keywords : TRIGA reactor, monitoring, radioactivity

PENDAHULUAN

Ilmu pengetahuan dan teknologi nuklir memberikan manfaat bagi manusia. Namun dalam pemanfaatannya, teknologi nuklir bisa berpotensi menimbulkan dampak negatif apabila ketentuan Keselamatan Nuklir tidak dilaksanakan dengan benar. Salah satu dampak negatif yang terjadi adalah terlepasnya zat radioaktif (radionuklida) ke lingkungan sehingga menyebabkan pencemaran radioaktivitas di lingkungan, seperti di udara, tanah, air atau komponen lingkungan lainnya. Radionuklida yang telah berada di lingkungan pada akhirnya sampai ke manusia melalui pencernaan

(konsumsi tanaman, daging, susu atau telur), melalui penghirupan, melalui kulit atau luka yang terbuka. Hal ini menyebabkan terpaparnya tubuh manusia oleh radiasi eksternal maupun internal.

Di Kotamadya Bandung – Propinsi Jawa Barat, terdapat reaktor nuklir TRIGA 2000 Bandung. Pada tahun 2000, reaktor TRIGA 2000 Bandung selesai di *up grade* daya operasinya dari desain daya operasi reaktor 1 mega Watt menjadi 2 mega Watt. Dalam perkembangan selanjutnya, pada tahun 2017 desain daya operasi reaktor TRIGA 2000 Bandung diturunkan menjadi 1 mega Watt kembali. Dalam operasi

reaktor TRIGA 2000 Bandung ini juga mempunyai potensi untuk melepaskan zat radioaktif atau radionuklida. Dalam keadaan reaktor beroperasi secara normal, tidak ada radioaktivitas buatan keluar ke lingkungan. Hal ini dikarenakan pada saat operasi normal, udara dari dalam gedung reaktor sebelum keluar ke lingkungan telah melalui proses penyaringan menggunakan filter beberapa lapis, serta limbah radioaktif padat, semi cair dan cair dikumpulkan di dalam gedung limbah. Namun demikian, sesuai dengan Peraturan Kepala BAPETEN, pemantauan terhadap radioaktivitas di lingkungan tetap harus dilaksanakan

BAPETEN sebagai Badan Pengawas Tenaga Nuklir di Indonesia telah membuat Peraturan-Peraturan. Diantara Peraturan-Peraturan yang telah dibuat oleh BAPETEN adalah Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013 [1]. Dalam Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013 pasal 25 intinya berbunyi untuk memastikan Nilai Batas Dosis (NBD) yang ditetapkan oleh BAPETEN agar tidak terlampaui maka Pemegang Ijin reaktor wajib melakukan pemantauan radioaktivitas lingkungan di luar fasilitas atau instalasi. Masih dalam Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013, di pasal 33 dikatakan bahwa pemantauan radioaktivitas lingkungan di luar fasilitas atau Instalasi paling sedikit meliputi: udara; air; tanah; dan biota. [1]. Untuk memenuhi ketentuan dalam Peraturan BAPETEN tersebut, PSTNT sebagai lembaga yang mempunyai reaktor TRIGA 2000 Bandung telah melakukan pemantauan radioaktivitas dalam komponen di lingkungan secara rutin, baik reaktor beroperasi normal maupun tidak beroperasi (*shut down*).

Dalam makalah di sini dibahas hasil pemantauan radioaktivitas di sekitar reaktor TRIGA 2000 Bandung tahun 2016, pada komponen rumput dan tanah. Data nilai radioaktivitas yang diperoleh dari hasil pemantauan digunakan sebagai *baseline* data dan evaluasi radioaktivitas spesifik tapak reaktor TRIGA 2000 Bandung. Evaluasi dilakukan dengan cara melakukan uji Homogenitas dan uji t pada masing-masing komponen, dengan tujuan untuk melihat apakah data hasil pemantauan berasal dari populasi sampel yang homogen atau tidak serta untuk melihat apakah data hasil pemantauan antara bulan yang satu dengan bulan yang lain, atau antara radius yang satu dengan yang lain berbeda nyata atau tidak.

METODOLOGI

Alat dan bahan:

Alat untuk memotong sampel rumput, *Kruss* porselin, *Furnace*, alat untuk mengambil sampel tanah (*sekop*), kantong plastik untuk wadah sampel, baki plastik untuk wadah mengeringkan sampel tanah, lampu pemanas 250 watt, *mortar* dan alu, ayakan ukuran 200 *mesh*, *spatula*, *planset* berukuran diameter 5 cm dan tinggi 0,5 cm, timbangan analitis, air destilasi, alat cacah Alpha-Beta, sarung tangan karet dan ATK.

Tata Kerja [2, 3, 4]:

Daerah pengambilan sampel rumput dan tanah diusahakan merupakan daerah yang datar, terbuka dan tidak terlindung pohon. Pemantauan dilakukan pada radius 100 m, 200 m, 500 m, 1000 m, dan 2000 m dari cerobong reaktor TRIGA 2000 Bandung. Radius 100 m, 200 m dan 500 m masing-masing mempunyai 4 lokasi pemantauan yang berbeda, sedangkan radius 1000 m dan 2000 m masing-masing mempunyai 5 lokasi pemantauan yang berbeda.

Sampel rumput diambil ± 2 cm di atas permukaan tanah (tanpa akar). Sementara itu, sampel tanah dapat diambil di bawah lokasi sampel rumput yang telah diambil sebelumnya. Masing-masing sampel diambil sebanyak ± 2 kg. Pengambilan sampel dilakukan secara acak pada daerah dengan luasan sekitar 1 m². Masing-masing sampel dimasukkan ke dalam kantong plastik dan diberi label sesuai dengan lokasi pengambilan sampel.

Sampel rumput dibersihkan dari pengotor yang terbawa saat pengambilan sampel, kemudian dicuci dan ditiriskan. Selanjutnya sampel rumput dimasukkan ke dalam *Kruss* porselin dan diabukan di dalam *furnace* pada suhu hingga 450 °C selama ± 24 jam. Sementara itu, sampel tanah dibersihkan dari pengotor (misal tanaman, pecahan kaca) yang terbawa saat pengambilan sampel. Kemudian dikeringkan di bawah lampu pemanas atau di bawah terik matahari hingga kering. Selanjutnya sampel tanah digerus (ditumbuk) menggunakan mortal dan alu, serta diayak.

Masing-masing abu sampel rumput dan tanah yang sudah diayak ditimbang sebanyak 1 g, diletakkan dalam *planset* serta diberi air destilasi. Kemudian sampel dalam *planset* dikeringkan kembali. Radioaktivitas *gross beta* yang terkandung dalam sampel dicacah menggunakan alat cacah Alpha-Beta. Masing-masing sampel dalam *planset* dicacah selama 3 menit dengan perulangan cacahan sebanyak 5 kali.

Data radioaktivitas yang diperoleh dari komponen rumput atau tanah dievaluasi menggunakan uji statistik, yaitu menggunakan uji Homogenitas dan uji t. Uji homogenitas dilakukan untuk melihat apakah data hasil pemantauan radioaktivitas suatu komponen berasal dari populasi yang homogen atau tidak, sedangkan uji t digunakan untuk melihat apakah data hasil pemantauan radioaktivitas dalam suatu komponen antara bulan yang satu dengan bulan yang lain, atau antara radius yang satu dengan yang lain berbeda nyata (signifikan) atau tidak. Uji homogenitas dan uji t dapat dilakukan dengan mengambil tingkat kepercayaan 95 % (atau tingkat kesalahan 5 %) atau tingkat kepercayaan 99 %. Tahapan uji homogenitas dan uji t sebagai berikut:

a. Langkah-langkah Melakukan Uji Homogenitas [5]

Uji homogenitas adalah pengujian mengenai sama tidaknya variansi-variansi 2 (dua) buah distribusi data atau lebih. Langkah-langkah melakukan uji homogenitas:

- 1) Menghitung Varians / Standar deviasi variabel *X* dan *Y*, dengan rumus :

$$S_x = \sqrt{\frac{n \sum X^2 - (\sum X)^2}{n(n-1)}} \quad (1)$$

$$S_y = \sqrt{\frac{n \sum Y^2 - (\sum Y)^2}{n(n-1)}} \quad (2)$$

dengan :

- X* : data kelompok *X*
- Y* : data kelompok *Y*
- S_x* : varians data kelompok *X*
- S_y* : varians data kelompok *Y*
- n* : jumlah data

- 2) Menghitung *F_{hitung}* dari varians *X* dan *Y*, dengan rumus :

$$F_{hitung} = \frac{S_{besa}}{S_{kecil}} \quad (3)$$

dengan :

- Pembilang : *S_{besa}* artinya varians dari kelompok dengan nilai varians terbesar
- Penyebut : *S_{keci}* artinya varians dari kelompok dengan nilai varians terkecil

Jika varians sama pada kedua kelompok, maka bebas menentukan pembilang dan penyebut

- 3) Membandingkan *F_{hitung}* dengan *F_{Tabe}* pada tabel distribusi F [6], pada tingkat kepercayaan 95 % (atau tingkat kesalahan 5 %) dengan :
 - dk pembilang = *n*-1
 - dk penyebut = *n*-1
 - Jika *F_{hitung}* < *F_{Tabe}* berarti homogen
 - Jika *F_{hitung}* > *F_{Tabe}* berarti tidak homogen

b. Langkah-langkah Melakukan Uji t [7]

Uji t adalah uji komparasi antar dua nilai pengamatan berpasangan, misalnya: sebelum dan sesudah. Langkah-langkah melakukan uji t :

- 1) Menentukan hipotesis yang digunakan (Tetapkan *H₀* dan *H₁*)

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

- 2) Tetapkan titik kritis (tingkat kepercayaan 95 % atau tingkat kepercayaan 99 %) yang terdapat pada Tabel t [8]
- 3) Tentukan daerah kritis, dengan db = *n* - 1
- 4) Tentukan t hitung dengan menggunakan rumus

$$D = x_{1i} - x_{2i} \quad (4)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \left\{ \sum D^2 - \frac{(\sum D)^2}{n} \right\}} \quad (5)$$

$$t_{hitung} = \frac{\left(\frac{\sum D}{n} \right)}{\left(\frac{S}{\sqrt{n}} \right)} \quad (6)$$

dengan :

- x_{1i}* : data kelompok 1
- x_{2i}* : data kelompok 2
- S* : varians data
- i* : 1, ..., *n*
- n* : jumlah data kelompok 1 atau kelompok 2

5) Lakukan uji signifikansi dengan membandingkan besarnya t_{hitung} dengan t_{Tabe}
 Kalau $|t_{hitung}| > t_{Tabe}$ maka H_0 ditolak

HASIL DAN PEMBAHASAN

Selama tahun 2016, reaktor TRIGA 2000 Bandung beroperasi sebanyak 3 kali, dengan tiap kali beroperasi selama 3 hari. Reaktor beroperasi pada daya 700 kilo Watt. Jadwal operasi reaktor TRIGA 2000 Bandung pada tahun 2016 dapat dilihat pada Tabel 1

Tabel 1. Jadwal operasi reaktor TRIGA 2000 Bandung tahun 2016

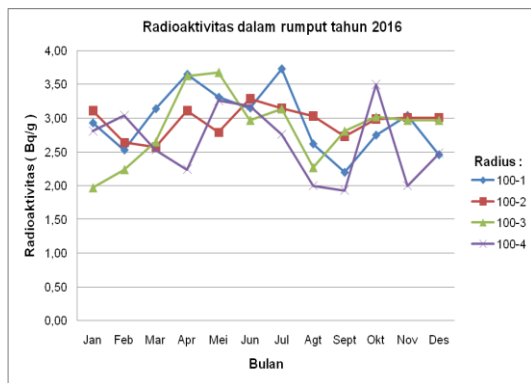
No.	Jadwal operasi reaktor TRIGA 2000 Bandung
1	20 – 22 April 2016
2	1 – 3 Juni 2016
3	1 – 3 Desember 2016

Data nilai radioaktivitas hasil pemantauan dalam sampel rumput dapat dilihat pada Grafik 1, 2, 3, 4, 5 dan 6; sedangkan untuk sampel tanah dapat dilihat pada Grafik 7, 8, 9, 10, 11 dan 12.

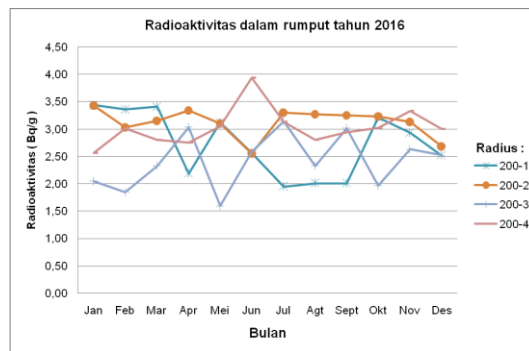
RUMPUT

Data yang diperoleh dari hasil pemantauan berfluktuasi. Pada radius 100 m (di dalam Kawasan Nuklir Bandung), diperoleh nilai radioaktivitas abu sampel rumput bervariasi dari 1,93 – 3,73 Bq/g dengan rata-rata $2,85 \pm 0,46$

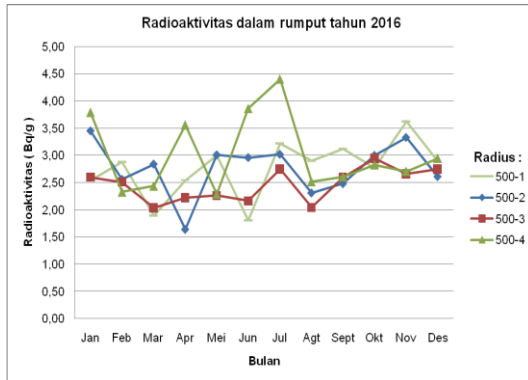
Bq/g; pada radius 200 m (di luar Kawasan Nuklir Bandung), nilai radioaktivitas bervariasi dari 1,60 – 3,94 Bq/g dengan rata-rata $2,82 \pm 0,51$ Bq/g; pada radius 500 m, nilai radioaktivitas bervariasi dari 1,64 – 4,40 Bq/g dengan rata-rata $2,75 \pm 0,54$ Bq/g; pada radius 1000 m, nilai radioaktivitas bervariasi dari 1,54 – 3,80 Bq/g dengan rata-rata $2,81 \pm 0,48$ Bq/g; pada radius 2000 m, nilai radioaktivitas bervariasi dari 1,47 – 3,96 Bq/g dengan rata-rata $2,77 \pm 0,56$ Bq/g.



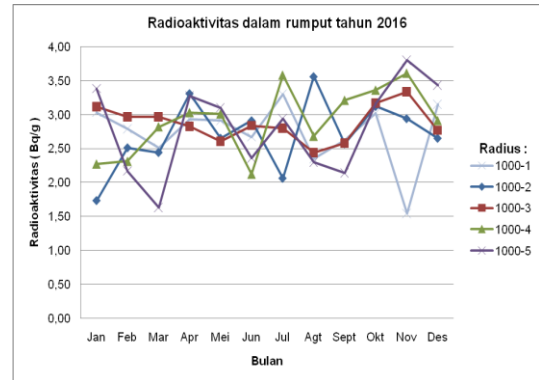
Gambar 1. Radioaktivitas sampel rumput dalam radius 100 m



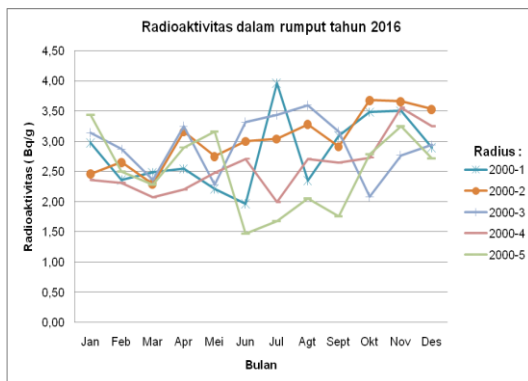
Gambar 2. Radioaktivitas sampel rumput dalam radius 200 m



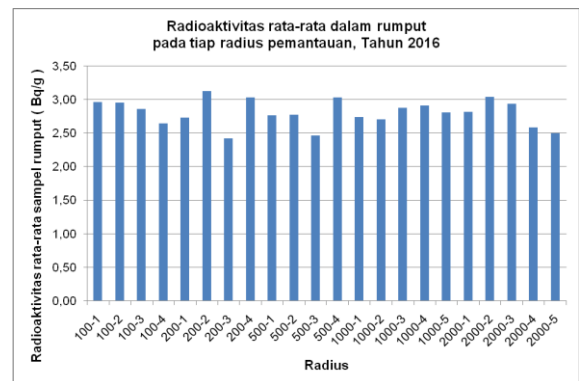
Gambar 3. Radioaktivitas sampel rumput dalam radius 500 m



Gambar 4. Radioaktivitas sampel rumput dalam radius 1000m



Gambar 5. Radioaktivitas sampel rumput dalam radius 2000 m



Gambar 6. Radioaktivitas rata-rata sampel rumput dalam tiap radius pemantauan tahun 2016

Selama tahun 2016, diperoleh nilai radioaktivitas dalam rumput minimum sebesar 1,47 Bq/g abu; maksimum sebesar 4,40 Bq/g abu; dan rata-rata sebesar 2,80 ±

0,51 Bq/g abu. Belum ada nilai baku mutu radioaktivitas dalam rumput yang diperbolehkan berada di lingkungan.

Tabel 2. Data minimum, maksimum dan rata-rata radioaktivitas sampel Rumput di sekitar reaktor TRIGA 2000 Bandung Tahun 2016

No	Pemantauan bulan	Radioaktivitas sampel Rumput (Bq/g abu)		
		Minimum	Maksimum	Rata-rata
1	Januari	1,73	3,79	2,84 ± 0,56
2	Februari	1,85	3,36	2,61 ± 0,36
3	Maret	1,63	3,41	2,53 ± 0,43
4	April	1,64	3,65	2,88 ± 0,54
5	Mei	1,60	3,68	2,80 ± 0,47
6	Juni	1,47	3,94	2,74 ± 0,62
7	Juli	1,68	4,40	3,02 ± 0,66
8	Agustus	2,00	3,60	2,61 ± 0,49
9	September	1,76	3,25	2,65 ± 0,43
10	Oktober	1,97	3,68	2,99 ± 0,40
11	November	1,54	3,80	3,06 ± 0,55
12	Desember	2,46	3,53	2,87 ± 0,29

Dalam tahun 2016, reaktor TRIGA 2000 Bandung beroperasi pada bulan April,

Juni dan Desember. Dari Tabel 2 terlihat bahwa nilai radioaktivitas minimum,

maksimum dan rata-rata dalam sampel rumput sebelum dan setelah reaktor beroperasi menunjukkan hampir tidak ada perbedaan yang signifikan. Beroperasinya reaktor TRIGA 2000 Bandung tidak mengubah radioaktivitas yang sudah ada di lingkungan. Untuk mengetahui ada atau tidaknya perbedaan tersebut maka di sini akan dilakukan uji homogenitas dan uji t.

Hasil uji homogenitas untuk data sampel Rumput

Hasil uji homogenitas terhadap data hasil pemantauan radioaktivitas dalam rumput sebagai berikut :

1) Uji homogen untuk data tiap bulanan

Pada tahun 2016, setiap bulan diperoleh 22 data pemantauan. Jadi dk pembilang = dk penyebut = 21. Sehingga berdasarkan Tabel F dengan tingkat kepercayaan 95 % diperoleh nilai $F_{Tab\epsilon} = 2,08$

Selanjutnya data bulan Januari diuji homogenitasnya dengan data bulan Februari, dengan cara mencari nilai F_{hitung} (persamaan 3). Diperoleh nilai $F_{hitung} = 1,56$.

Jadi nilai $F_{hitung} < F_{Tab\epsilon}$ ini artinya data bulan Januari dan Februari homogen.

Dengan cara uji yang sama, kemudian data bulan Januari diuji homogenitasnya dengan masing-masing data bulan Maret, April, Mei, Juni, Juli, Agustus, September, Oktober, November, dan Desember. Masing-masing hasil ujinya adalah homogen.

Uji yang sama dilakukan terhadap data bulan-bulan yang lain di tahun 2016. Secara keseluruhan, dari 66 pengujian diperoleh 64 pengujian hasilnya homogen dan 2 pengujian hasilnya tidak homogen (uji antara bulan Juni dengan Desember; uji antara bulan Juli dengan Desember). Ini berarti bahwa data radioaktivitas yang diperoleh antara bulan yang satu dengan bulan yang lainnya berasal dari populasi yang homogen (kondisi sampel homogen). Beroperasinya reaktor TRIGA 2000 Bandung (pada bulan April, Juni dan Desember 2016) tidak

mempengaruhi radioaktivitas yang sudah ada di lingkungan.

2) Uji homogen untuk data tiap radius

Dari bulan Januari hingga Desember tahun 2016, dari tiap lokasi pemantauan diperoleh 12 data pemantauan. Radius 100 m, 200 m dan 500 m masing-masing mempunyai 4 lokasi pemantauan yang berbeda, sedangkan radius 1000 m dan 2000 m masing-masing mempunyai 5 lokasi pemantauan yang berbeda. Jadi dk pembilang = dk penyebut = 11. Sehingga berdasarkan Tabel F dengan tingkat kepercayaan 95 % diperoleh nilai $F_{Tab\epsilon} = 2,82$

Selanjutnya data radius 100–1 diuji homogenitasnya dengan data radius 100–2, dengan cara mencari nilai F_{hitung} Diperoleh $F_{hitung} = 2,13$.

Jadi nilai $F_{hitung} < F_{Tab\epsilon}$ ini artinya data radius 100–1 dan 100–2 homogen.

Dengan cara uji yang sama, kemudian data radius 100–1 diuji homogenitasnya dengan masing-masing data radius 100–3, 100–4, 200–1, 200–2, 200–3, 200–4, 500–1, 500–2, 500–3, 500–4, 1000–1, 1000–2, 1000–3, 1000–4, 1000–5, 2000–1, 2000–2, 2000–3, 2000–4, 2000–5. Masing-masing hasil ujinya adalah homogen.

Selanjutnya data radius 100–2 diuji homogenitasnya dengan masing-masing data radius 100–3, 100–4, 200–1, 200–2, 200–3, 200–4, 500–1, 500–2, 500–3, 500–4, 1000–1, 1000–2, 1000–3, 1000–4, 1000–5, 2000–1, 2000–2, 2000–3, 2000–4, 2000–5.

Uji yang sama dilakukan terhadap data radius-radius yang lain di tahun 2016. Secara keseluruhan, dari 231 pengujian diperoleh 228 pengujian hasilnya homogen dan 3 pengujian hasilnya tidak homogen (uji antara radius 100–2 dengan 500–4; antara radius 100–2 dengan 1000–5; antara radius 100–2 dengan 2000–5). Ini berarti bahwa data radioaktivitas yang diperoleh antara radius yang satu dengan radius yang lainnya berasal dari populasi yang homogen (kondisi sampel

homogen walaupun jarak/radius pengambilan sampel berbeda).

Hasil uji t untuk data sampel Rumput

Hasil uji t terhadap data hasil pemantauan radioaktivitas dalam rumput dengan tingkat kepercayaan 95 % adalah sebagai berikut :

1) Uji t untuk data tiap bulanan

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

H_0 : tidak ada perbedaan yang signifikan antara data bulan 1 dengan bulan 2

H_1 : ada perbedaan yang signifikan antara data bulan 1 dengan bulan 2

Pada tahun 2016, setiap bulan diperoleh 22 data pemantauan. Jadi db = 21. Sehingga berdasarkan Tabel t dengan tingkat kepercayaan 95 % diperoleh nilai $t_{Tabe} = 2,08$. Selanjutnya data bulan Januari diuji t dengan data bulan Februari, dengan cara mencari nilai $|t_{hitung}|$ (persamaan 6). Diperoleh $|t_{hitung}| = 2,01$.

Jadi nilai $|t_{hitung}| < t_{Tabe}$ ini artinya H_0 diterima atau tidak ada perbedaan antara data bulan Januari dan Februari. Dengan cara uji t yang sama, kemudian data bulan Januari diuji t dengan masing-masing data bulan Maret, April, Mei, Juni, Juli, Agustus, September, Oktober, November, dan Desember.

Uji t yang sama dilakukan terhadap data bulan-bulan yang lain di tahun 2016. Secara keseluruhan, dari 66 pengujian t diperoleh 46 hasilnya H_0 diterima dan 20 hasilnya H_0 tidak diterima. Secara umum ini berarti bahwa data radioaktivitas yang diperoleh antara bulan yang satu dengan bulan yang lainnya tidak berbeda secara signifikan. Atau dapat dikatakan bahwa data radioaktivitas yang diperoleh antara sebelum dan sesudah reaktor TRIGA 2000 Bandung beroperasi menunjukkan tidak berbeda secara signifikan.

2) Uji t untuk data tiap radius

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

H_0 : tidak ada perbedaan yang signifikan antara data radius 1 dengan radius 2

H_1 : ada perbedaan yang signifikan antara data radius 1 dengan radius 2

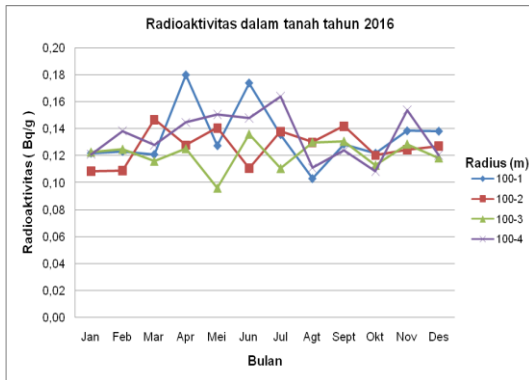
Dari Tabel 2, selama 1 tahun dalam tiap-tiap radius diperoleh 12 data pemantauan. Jadi db = 11. Sehingga berdasarkan Tabel t dengan tingkat kepercayaan 95 % diperoleh nilai $t_{Tabe} = 2,20$. Selanjutnya data radius 100-1 diuji t dengan data radius 100-2, dengan cara menghitung $|t_{hitung}|$. Diperoleh $|t_{hitung}| = 0,05$.

Jadi nilai $|t_{hitung}| < t_{Tabe}$ ini artinya H_0 diterima atau tidak ada perbedaan antara data radius 100-1 dan radius 100-2. Dengan cara uji yang sama, kemudian data radius 100-1 diuji t dengan masing-masing data radius 100-3, 100-4, 200-1, 200-2, 200-3, 200-4, 500-1, 500-2, 500-3, 500-4, 1000-1, 1000-2, 1000-3, 1000-4, 1000-5, 2000-1, 2000-2, 2000-3, 2000-4, 2000-5.

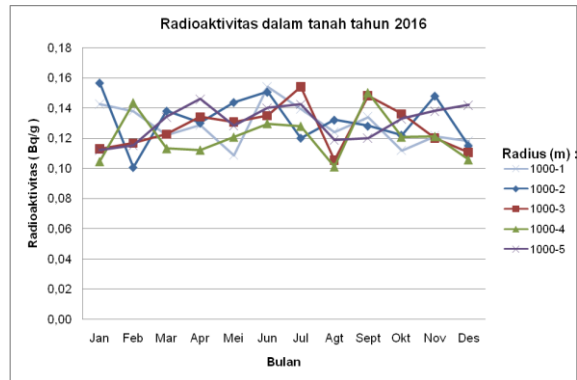
Selanjutnya data radius 100-2 diuji t dengan masing-masing data radius 100-3, 100-4, 200-1, 200-2, 200-3, 200-4, 500-1, 500-2, 500-3, 500-4, 1000-1, 1000-2, 1000-3, 1000-4, 1000-5, 2000-1, 2000-2, 2000-3, 2000-4, 2000-5.

Uji yang sama dilakukan terhadap data radius-radius yang lain di tahun 2016. Secara keseluruhan, dari 231 pengujian t diperoleh 192 hasilnya H_0 diterima dan 39 hasilnya H_0 tidak diterima. Secara umum ini berarti bahwa data radioaktivitas yang diperoleh antara radius yang satu dengan radius yang lainnya tidak berbeda secara signifikan (walaupun jarak/radius pengambilan sampel berbeda).

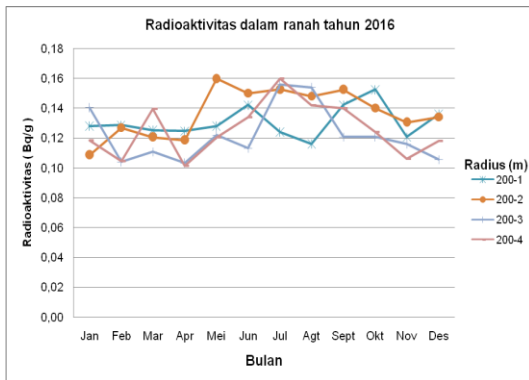
TANAH



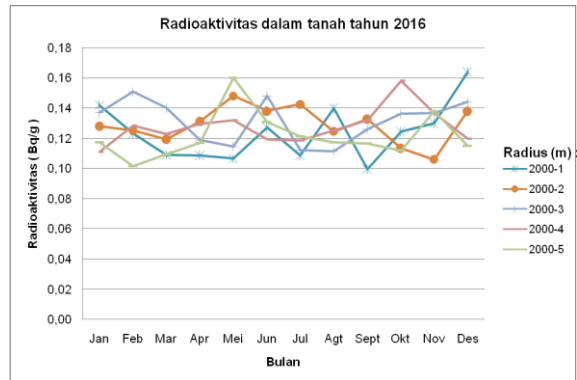
Gambar 7. Radioaktivitas sampel tanah dalam radius 100 m



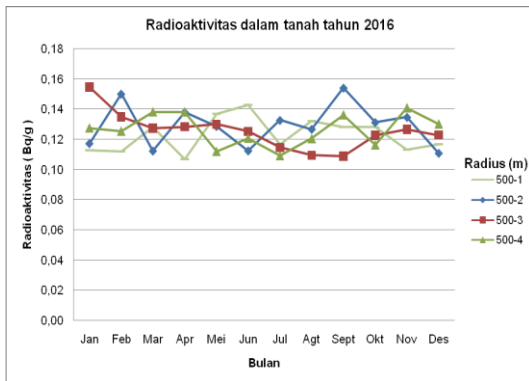
Gambar 10. Radioaktivitas sampel tanah dalam radius 1000 m



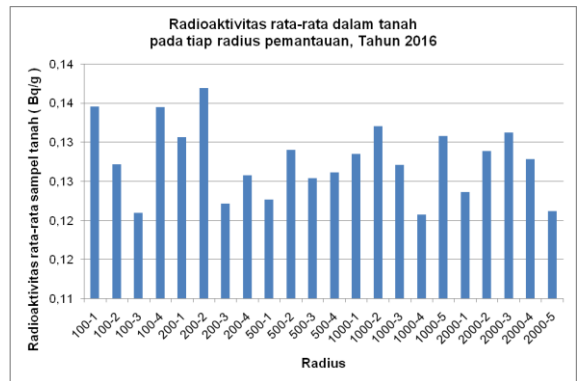
Gambar 8. Radioaktivitas sampel tanah dalam radius 200 m



Gambar 11. Radioaktivitas sampel tanah dalam radius 2000 m



Gambar 9. Radioaktivitas sampel tanah dalam radius 500 m



Gambar 12. Radioaktivitas rata-rata sampel tanah dalam tiap radius pemantauan tahun 2016

Pada radius 100 m (di dalam kawasan nuklir Bandung), diperoleh nilai radioaktivitas sampel tanah bervariasi dari 0,10 – 0,18 Bq/g dengan rata-rata $0,13 \pm 0,02$ Bq/g; pada radius 200 m (di luar kawasan nuklir Bandung), nilai radioaktivitas bervariasi dari 0,10–0,16 Bq/g dengan rata-rata $0,13 \pm 0,02$ Bq/g; pada radius

500 m, nilai radioaktivitas bervariasi dari 0,11 – 0,15 Bq/g dengan rata-rata $0,13 \pm 0,01$ Bq/g; pada radius 1000 m, nilai radioaktivitas bervariasi dari 0,10 – 0,16 Bq/g dengan rata-rata $0,13 \pm 0,01$ Bq/g; pada radius 2000 m, nilai radioaktivitas bervariasi dari 0,10 – 0,16 Bq/g dengan rata-rata $0,13 \pm 0,01$ Bq/g.

Tabel 3. Data minimum, maksimum dan rata-rata radioaktivitas dalam sampel Tanah di sekitar reaktor TRIGA 2000 Bandung Tahun 2016

No	Pemantauan bulan	Radioaktivitas sampel Tanah (Bq/g)		
		Minimum	Maksimum	Rata-rata
1	Januari	0,10	0,16	0,12 ± 0,01
2	Februari	0,10	0,15	0,12 ± 0,01
3	Maret	0,11	0,15	0,12 ± 0,01
4	April	0,10	0,18	0,13 ± 0,02
5	Mei	0,10	0,16	0,13 ± 0,02
6	Juni	0,11	0,17	0,14 ± 0,02
7	Juli	0,11	0,16	0,13 ± 0,02
8	Agustus	0,10	0,15	0,12 ± 0,01
9	September	0,10	0,15	0,13 ± 0,01
10	Oktober	0,11	0,16	0,13 ± 0,01
11	November	0,11	0,15	0,13 ± 0,01
12	Desember	0,11	0,16	0,12 ± 0,01

Selama tahun 2016 diperoleh nilai radioaktivitas dalam tanah minimum sebesar 0,10 Bq/g; maksimum sebesar 0,18 Bq/g dengan rata-rata sebesar 0,13 ± 0,01 Bq/g. Belum ada nilai baku mutu radioaktivitas dalam tanah yang diperbolehkan berada di lingkungan. Dari Tabel 3 terlihat bahwa nilai radioaktivitas dalam tanah sebelum dan setelah reaktor beroperasi menunjukkan hampir tidak ada perbedaan yang signifikan. Untuk mengetahui ada atau tidaknya perbedaan tersebut maka di sini akan dilakukan uji homogenitas dan uji t.

Hasil uji homogenitas dan uji t untuk data sampel Tanah

Dengan cara uji yang sama dengan yang dilakukan pada komponen Rumput sebelumnya, maka diperoleh hasil uji homogenitas dan uji t terhadap data hasil pemantauan radioaktivitas dalam tanah sebagai berikut :

1) Uji homogen untuk data tiap bulan

Secara keseluruhan, dari 66 pengujian diperoleh hasil pengujian homogen semua. Ini berarti bahwa data radioaktivitas Tanah yang diperoleh antara bulan yang satu dengan bulan yang lainnya berasal dari populasi yang homogen.

2) Uji homogen untuk data tiap radius

Secara keseluruhan, dari 231 pengujian diperoleh hasil pengujian

homogen semua. Ini berarti bahwa data radioaktivitas Tanah yang diperoleh antara radius yang satu dengan radius yang lainnya berasal dari populasi yang homogen.

3) Uji t untuk data tiap bulan

Secara keseluruhan, dari 66 pengujian diperoleh 59 hasilnya H_0 diterima dan 7 hasilnya H_0 tidak diterima. Secara umum ini berarti bahwa data radioaktivitas Tanah yang diperoleh antara bulan yang satu dengan bulan yang lainnya tidak berbeda secara signifikan.

4) Uji t untuk data tiap radius

Secara keseluruhan, dari 231 pengujian diperoleh 216 hasilnya H_0 diterima dan 15 hasilnya H_0 tidak diterima. Secara umum ini berarti bahwa data radioaktivitas Tanah yang diperoleh antara radius yang satu dengan radius yang lainnya tidak berbeda secara signifikan.

KESIMPULAN

Pemantauan radioaktivitas gross Beta dalam rumput dan tanah di sekitar reaktor TRIGA 2000 Bandung tahun 2016, dengan lokasi pemantauan mulai dari radius 100 m hingga radius 2000 m dari cerobong reaktor telah dilakukan. Nilai radioaktivitas gross Beta hasil pemantauan dalam sampel rumput berfluktuasi antara 1,47 – 4,40 Bq/g abu dengan rata-rata 2,80 ± 0,51 Bq/g abu;

sementara dalam tanah berkisar antara 0,10 – 0,18 Bq/g dengan rata-rata $0,13 \pm 0,01$ Bq/g. Belum ada nilai baku mutu radioaktivitas dalam rumput dan tanah yang diperbolehkan berada di lingkungan. Dengan melakukan uji homogenitas dan uji t terhadap data nilai radioaktivitas yang diperoleh selama tahun 2016 serta dengan menggunakan tingkat kepercayaan 95 % dapat dikatakan bahwa data hasil pemantauan radioaktivitas dalam rumput atau tanah yang berasal dari beberapa lokasi dan waktu pemantauan adalah homogen (dari populasi yang homogen) serta tidak berbeda secara signifikan antara sebelum dan setelah reaktor beroperasi di tahun 2016.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pusat Sains Dan Teknologi Nuklir Terapan (PSTNT) yang telah memberikan dukungan dana dan fasilitas lainnya sehingga pemantauan radioaktivitas di sekitar reaktor TRIGA 2000 Bandung terlaksana dengan lancar dan baik. Tidak lupa penulis juga mengucapkan terima kasih kepada rekan-rekan Staf Sub Bidang KKPR PSTNT yang telah membantu pelaksanaan pemantauan ini terutama dalam pengambilan sampel di lingkungan

DAFTAR PUSTAKA

1. Perka BAPETEN, “Proteksi Dan Keselamatan Radiasi Dalam Pemanfaatan Tenaga Nuklir”, Perka BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013, BAPETEN (2013)
2. IAEA-TECDOC 1415, “*Soil Sampling For Environmental Contaminants*”, IAEA, Vienna (2004)
3. IAEA, “*Programmes and Systems for Source and Environmental Radiation Monitoring*”, Safety Report Series No.64, Vienna (2010)
4. SB 014-BATAN, “Pedoman Tentang Analisis Sampel Radioaktivitas Lingkungan”, BATAN, Jakarta (2013)
5. <https://www.statistikian.com/2013/01/uji-homogenitas.html>, diunduh 24 Februari 2017
6. <http://dinus.ac.id/repository/docs/ajar/tabel-f-0-05.pdf>, diunduh 24 Februari 2017
7. <http://statistikceria.blogspot.co.id/2013/12/Pengujian-Perbedaan-data-rata-Dua-kelompok-berpasangan-dependent-parametrik.html>, diunduh 24 Februari 2017
8. <http://ledhyane.lecture.ub.ac.id/files/2013/04/tabel-t.pdf>, diunduh 24 Februari 2017

PERFORMA *SUBSURFACE FLOW CONSTRUCTED WETLAND* MENGGUNAKAN TANAMAN MELATI AIR DAN MEDIA TANAM ZEOLIT DALAM MENGOLAH LIMBAH CAIR TAMBANG EMAS RAKYAT

¹Angge Dhevi Warisaura, ²Agus Prasetya

¹Mahasiswa Magister Teknik Pengendalian Pencemaran Lingkungan Universitas Gadjah Mada

²Dosen Departemen Teknik Kimia Universitas Gadjah Mada

Jl. Grafika No.2 Yogyakarta 55281

Telp. 0274-555320

angge.dhevi@gmail.com

ABSTRAK

PERFORMA *SUBSURFACE FLOW CONSTRUCTED WETLAND* MENGGUNAKAN TANAMAN MELATI AIR DAN MEDIA TANAM ZEOLIT DALAM MENGOLAH LIMBAH CAIR TAMBANG EMAS RAKYAT. Pengolahan emas rakyat pada umumnya menggunakan merkuri (Hg) yang sering disebut proses amalgamasi. Pemakaian merkuri ini mengakibatkan penurunan kualitas lingkungan terutama perairan akibat *release* Hg ketika proses amalgamasi. Berdasarkan hal tersebut, telah dilakukan penelitian perancangan pengolahan limbah cair yang mengandung Hg dengan memanfaatkan teknologi sederhana dan sumber daya alam yang mudah didapatkan. Teknologi pengolahan yang dilakukan adalah menggunakan sistem *wetland* artifisial aliran *Subsurface flow* (SSF) yang berisi tanaman Melati Air (*Echinodorus palaefolius*) dengan media tanam zeolit. Model sistem SSF ini mempunyai dimensi 820 mm x 320 mm x 585 mm terdiri dari 3 zona, yaitu zona inlet, zona reaksi dan zona outlet. Pada zona reaksi ditanamkan Melati Air dengan luasan 0,0896 gr/cm² pada zeolit ukuran 4-18 mesh. Air limbah Hg simulasi dengan konsentrasi 14,94 mg/L dialirkan secara *up-flow* menuju zona reaksi menggunakan pompa. Untuk keperluan penentuan performa sistem, operasi dijalankan 12 jam kontinu dan 12 jam *batch* selama 3 hari. Hasil penelitian menunjukkan efisiensi removal Hg menggunakan sistem SSF ini mencapai 91,99%, sehingga konsentrasi akhir rata-rata Hg = 1,20 mg/L.

Kata Kunci : *Constructed Wetland*, SSF, melati air, Hg.

ABSTRACT

PERFORMANCE OF THE *SUBSURFACE FLOW CONSTRUCTED WETLAND* USING *ECHINODORUS PALAEFOLIUS* AND ZEOLITE PLANT MEDIA IN ARTISANAL SMALL SCALE GOLD MINING WASTEWATER. Processing of gold in artisanal small scale generally uses mercury (Hg) which is often called the process of amalgamation. The use of mercury make degradation of environmental quality especially waters due to Hg release during amalgamation process. Based on this, has been conducted research design of wastewater containing Hg treatment by utilizing simple technology and natural resources that are easily obtained. Processing technology that had established is using wetland system with subsurface flow (SSF) which contains *Echinodorus palaefolius* plant with zeolite planting medium. This SSF system model has dimensions of 820 mm x 320 mm x 585 mm consisting of 3 zones, namely inlet zone, reaction zone and outlet zone. In the reaction zone implanted *Echinodorus palaefolius* with an area of 0.0896 gr / cm² on zeolite size 4-18 mesh. The simulated Hg wastewater with concentration of 14,94 mg / L is passed with *up-flow* to the reaction zone using the pump. For the purposes of determining system performance, operation runs 12 hours of continuous and 12 hours of batch for 3 days. The results showed that Hg removal efficiency using SSF system reached 91.99%, so the final average concentration of Hg = 1.20 mg / L.

Keywords : *Constructed Wetland*, SSF, *Echinodorus palaefolius*, Hg.

PENDAHULUAN

Dengan potensi batuan mineral emas yang tinggi, Indonesia menjadi penyumbang cemaran merkuri (Hg) pada air dan tanah terbesar ketiga di dunia [1]. Modal dan teknologi yang minim tidak menjadi hambatan untuk melakukan penambangan yakni melalui penambangan emas skala kecil atau penambangan emas rakyat atau tradisional (*Artisanal Small Scale Gold Mining-ASGM*). Di Indonesia, jumlah kegiatan tambang skala kecil ada 713 lokasi yang tersebar di Jawa, Sumatra, Kalimantan, dan Sulawesi dengan 60.000 penambang skala kecil [2]. Penambangan melalui metode ini banyak menggunakan merkuri dalam

pengolahan bijih emasnya. Penggunaan merkuri bertujuan untuk mengekstrak emas dari bijih dengan membentuk amalgam yang merupakan campuran antara merkuri dan emas dengan jumlah perbandingan yang sama. Amalgam yang telah terbentuk kemudian dipanaskan untuk menguapkan merkuri dari campuran, sehingga hanya emas yang akan tersisa. Merkuri yang menguap akhirnya mengendap di tanah *tailing* dan masuk ke badan perairan. Dalam perairan, merkuri bereaksi dengan komponen perairan, menjadi terendapkan ke dasar perairan kemudian diubah oleh organisme anaerobik menjadi metil merkuri. Dalam air, metil merkuri diserap oleh fitoplankton, tertelan oleh

zooplankton dan ikan sehingga mencemari rantai makanan.

Penambangan emas primer yang relatif baru yaitu sekitar lima tahun terakhir terdapat pada penelitian Fahmi et al (2014) yaitu pada area tambang rakyat Paningkaban-Cihonje dan sekitarnya di Desa Paningkaban, Desa Cihonje dan Desa Gancang, Kecamatan Gumelar, Kabupaten Banyumas, Provinsi Jawa Tengah. Kadar rata-rata merkuri pada seluruh sampel tailing di lokasi tersebut sebesar 126,761 ppm, sedangkan pada sampel tanah/batuan memiliki rata-rata kadar merkuri sebesar 72,800 ppm. Nilai rata-rata kadar merkuri terendah dijumpai pada sampel air sungai, yaitu sebesar 1,003 ppm dan pada sampel air tanah sebesar 0,867 ppm[3]. Sementara diketahui menurut lampiran Peraturan Pemerintah Nomor 82 Tahun 2001 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air, kriteria mutu air berdasarkan kelas untuk parameter merkuri (Hg) adalah 0,001 mg/L untuk kelas I, 0,002 mg/L untuk kelas II dan III, serta 0,005 mg/L untuk kelas IV. Hal ini menandakan bahwa konsentrasi merkuri di daerah tersebut sudah melebihi ambang batas[4].

Berdasarkan kondisi di atas, metode pengolahan limbah cair tambang emas rakyat yang efektif efisien penting dikaji untuk meningkatkan kualitas lingkungan dan kualitas hidup di sekitar penambangan emas. Beberapa metode pengolahan limbah cair telah diaplikasikan untuk menangani permasalahan limbah cair tambang emas rakyat, termasuk salah satunya menggunakan *Constructed Wetland* yang merupakan salah satu metode alternatif dalam pengolahan limbah cair yang meniru proses purifikasi alami pada daerah rawa atau lahan basah. Dibandingkan dengan pengolahan limbah konvensional yang menggunakan bahan kimia, proses ini lebih sederhana, murah dan ramah lingkungan. Ada 2 tipe dari *Constructed Wetland* berdasarkan lokasi pengaturan aliran yaitu : (1) *Surface Flow* (SF) dan (2) *Subsurface Flow* (SSF), jika berdasar tipe tanaman yang digunakan, dibagi menjadi : (1) *floating aquatic plant system* (2) *submerged aquatic plant system* dan (3) *amphibious aquatic plant system*[5]. Setiap jenis *wetland* mempunyai spesifikasi tanaman tertentu dengan yang akan bekerja menyerap polutan. SSF-CW memiliki beberapa keunggulan dibanding tipe lainnya menurut Kadlec and Knight (1996), antara lain : (1) konstruksi sederhana, (2) dapat ditempatkan dimana saja (*indoor atau outdoor*) (3) sistem operasi yang luwes (sistem gravitasi maupun sistem pompa) (4) biaya murah (5) tidak timbul bau selama kontak dengan udara (6) performa

sistem dapat diandalkan (7) tidak timbul populasi nyamuk dan (8) penampilan serupa kebun sehingga punya nilai estetika[6]. Setiap jenis *wetland* mempunyai spesifikasi tanaman tertentu dengan yang akan bekerja menyerap polutan. Pada *Sub Surface Flow* air tidak menggenangi di atas media tanam, tetapi air mengalir di bawah media tanam sehingga tanaman yang sesuai adalah jenis tanaman air *emergent*, yaitu setengah tenggelam dalam air sehingga sering disebut *amphibious aquatic plant*. Salah satu tanaman *emergent* yang cukup potensial sebagai penyerap logam berat adalah melati air (*Echinodorus palaefolius*).

Aplikasi *Sub Surface-Flow Constructed Wetland* (SSF-CW) yang telah dilakukan dalam beberapa tahun terakhir antara lain untuk pengolahan *leachate* tempat pembuangan akhir sampah melalui proses fitoremediasi dengan tanaman Bambu Air (*Equisetum hyemale*) dan media tanam zeolit yang dipaparkan oleh Suharto dkk (2011). Eksperimen secara *batch* dan kontinyu telah dilakukan dengan hasil terbaik penurunan kadar Pb mencapai 82,2% pada sistem *batch*, dan hasil terbaik penurunan Cr sebesar 61,2% pada sistem kontinyu [7]. Untuk tanaman melati air (*Echinodorus palaefolius*) berdasar penelitian Caroline dan Arron (2015) mampu menurunkan konsentrasi timbal (Pb) hingga < 0,0764 mg/L dari konsentrasi awalnya sebesar 1,638 mg/L dengan waktu paparan 18 hari [8]. Pernyataan ini didukung oleh hasil penelitian Malik dkk (2016) yang menunjukkan bahwa tanaman *Echinodorus palaefolius* mampu mengakumulasi logam kromium sebesar 6,12 ppm dan mampu menurunkan konsentrasi kromium dalam limbah cair tekstil dari 1,21 mg/L menjadi 0,03 mg/L [9].

Pada penelitian ini akan dilakukan kajian eksperimental perancangan alat SSF-CW skala laboratorium menggunakan tanaman melati air sebagai fitoremediator dan zeolit sebagai media tanam. Kajian eksperimental ini bertujuan untuk menentukan performa SSF-CW dalam menurunkan kadar merkuri limbah cair dengan meninjau efisiensi *removal* merkuri. Performa SSF-CW yang baik tentu akan dapat memberikan informasi alternatif pengolahan limbah cair mengandung Hg, terutama limbah cair tambang emas rakyat.

METODOLOGI

Bahan

Bahan yang digunakan sebagai limbah cair pertambangan emas rakyat dibuat dari reagen HgCl₂ p.a EMSURE (MERCK). Untuk keperluan tanaman SSF-CW digunakan tanaman melati air (*Echinodorus palaefolius*) berumur 3

bulan dengan ukuran seragam, segar, bebas hama, tanpa kehilangan akar maupun bunganya, didapat dari kebun milik toko tanaman "Studio 4" Gembiraloka yang berlokasi di Jl. Wonosari, Berbah, Sleman, Yogyakarta. Zeolit alam yang dipakai sebagai media adalah zeolit tipe modernit yang diperoleh dari Klaten, Jawa Tengah.

Alat

Alat utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebuah reaktor SSF-CW yang terdiri dari plat berbahan akrilik tebal 1 mm dengan dilengkapi plat yang memiliki lubang-lubang, pipa PVC, pompa, dan kran. Sampling untuk pengukuran kadar merkuri dapat dilakukan dari bak tampungan pipa outlet.

Prosedur kerja

Tahapan penelitian meliputi beberapa tahap antara lain :

1. Tahap Perancangan Alat SSF-CW Skala Laboratorium

Tahap ini merupakan proses pembuatan rangkaian reaktorskala laboratorium untuk mensimulasikan model sistem SSF-CW dengan memperhatikan parameter desain *wetland* yang telah ada sebelumnya.

2. Tahap Preparasi Larutan Limbah Merkuri

Air limbah merkuri dibuat dengan melarutkan sejumlah massa $HgCl_2$ murni ke dalam 1 liter volume aquadest untuk mendapatkan konsentrasi yang diinginkan dalam mg/L (ppm). Konsentrasi merkuri yang digunakan dalam perlakuan yaitu 15 ppm sebanyak volume yang dibutuhkan.

3. Tahap Penyiapan Media Zeolit

Zeolit yang digunakan adalah zeolit alam yang diperoleh dari Klaten, Jawa Tengah. Sebelum dimasukkan ke dalam reaktor, zeolit diambil 500 gram untuk dianalisis distribusi ukuran butirnya dengan cara mengayaknya dalam *sieve tray* ukuran 4-18 mm.

4. Tahap Pengoperasian SSF-CW

Tahap ini merupakan proses pengoperasian reaktor yang telah berisi tanaman melati air dan zeolit sesuai kapasitas dari desain reaktor yang dibuat.

Pengondisian SSF-CW

Sebelum dipakai, SSF-CW dipastikan tidak memiliki celah yang memungkinkan air limbah merembes. Jika terjadi rembesan, maka dilakukan *sealing* dengan lem silikon. Setelah lolos uji kebocoran, reaktor diisi media zeolit

yang sudah dianalisis distribusi ukuran butirnya, ketebalan media disesuaikan dengan desain reaktor yang dibuat yaitu 40 cm.

Tahap Aklimatisasi Tanaman

Tahapan ini merupakan tahap adaptasi tanaman terhadap reaktor SSF-CW dimana media tanaman dari pembibitan dipindah ke sebuah reaktor agar dapat menyesuaikan diri dari lingkungan baru dan dapat bertahan hidup. Tahap aklimatisasi ini dilakukan terhadap media penelitian yaitu zeolit. Pada tahap aklimatisasi terhadap media, tanaman ditumbuhkan dalam media zeolit untuk mengetahui ketahanan tanaman terhadap bahan penelitian. Penanaman disesuaikan dengan panjang dan lebar desain reaktor. Tahap ini dilangsungkan selama 30 hari dengan sirkulasi air ledeng secara berkala.

Pengoperasian SSF-CW

Sampel air limbah merkuri dengan konsentrasi tertentu dipompa ke dalam reaktor menggunakan pompa peristaltik secara *up-flow*, inlet berada pada bagian reaktor paling bawah dan outlet pada bagian atas. Pemompaan sampel air limbah dilakukan dengan pengaturan debit pemompaan sesuai dengan variasi waktu detensi yang diinginkan. Pada penelitian ini operasi dijalankan secara semi kontinu, dialirkan batch selama 12 jam dan kontinu selama 12 jam. Air limbah dialirkan dari bak penampungan awal dengan debit 127 mL/menit.

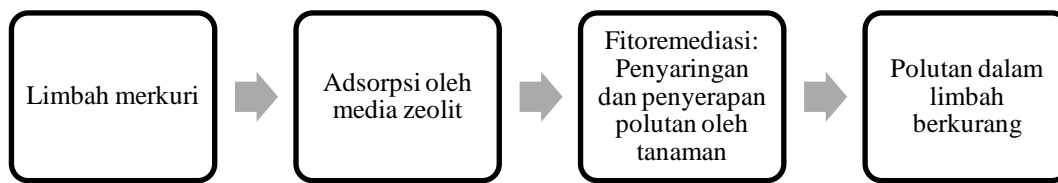
Pengambilan sampel hasil olahan SSF-CW

Pada aliran kontinu, setiap 1 kali masa tinggalnya yaitu 4 jam sekali dilakukan pengambilan sampel pada outlet SSF-CW untuk dianalisis kadar merkuri menggunakan *Mercury Analyzer* sesuai dengan metode SNI 6989.78 : 2011 di LPPT Universitas Gadjah Mada. Sedangkan pada aliran *batch* diambil sampel awal dan akhir proses batch. Efisiensi penurunan kadar merkuri dapat ditentukan dengan membandingkan antara penurunan kadar merkuri setelah proses *wetland* terhadap kadar merkuri dalam limbah cair awal.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perancangan SSF-CW.

Constructed Wetland yang digunakan dalam penelitian ini adalah tipe *Sub Surface Flow* dengan aliran *upflow*, artinya dikontakkan terlebih dahulu dengan media zeolit kemudian naik menuju zona perakaran tanaman untuk kemudian keluar menuju *outlet*. Adapun skema yang diinginkan adalah sebagai berikut :



Sehingga dari standar parameter desain tersebut, dapat disusun karakter desain dari reaktor yang digunakan dalam penelitian ini :

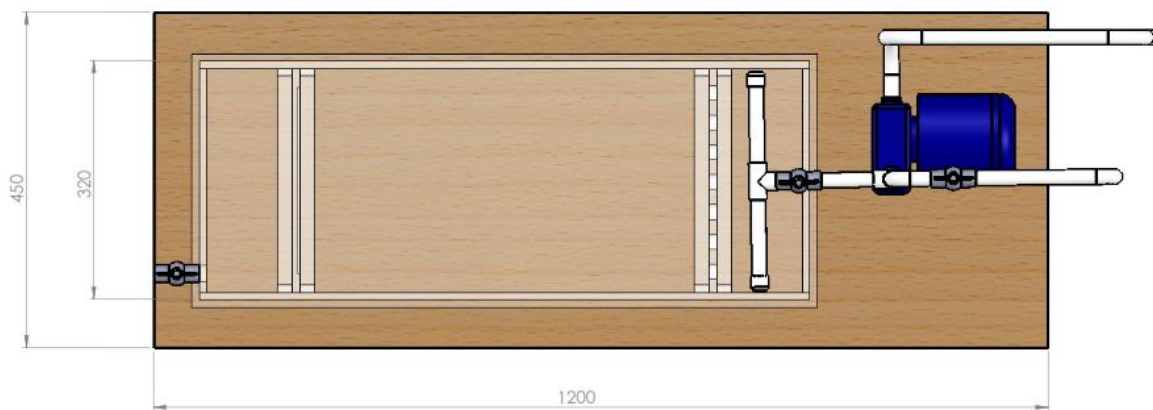
Ukuran reaktor, dimana rasio panjang : lebar = 2 : 1

Tanaman *Echinodorus palaefolius* ditanam pada reaktor dengan luasan 0,0896 gr/cm²

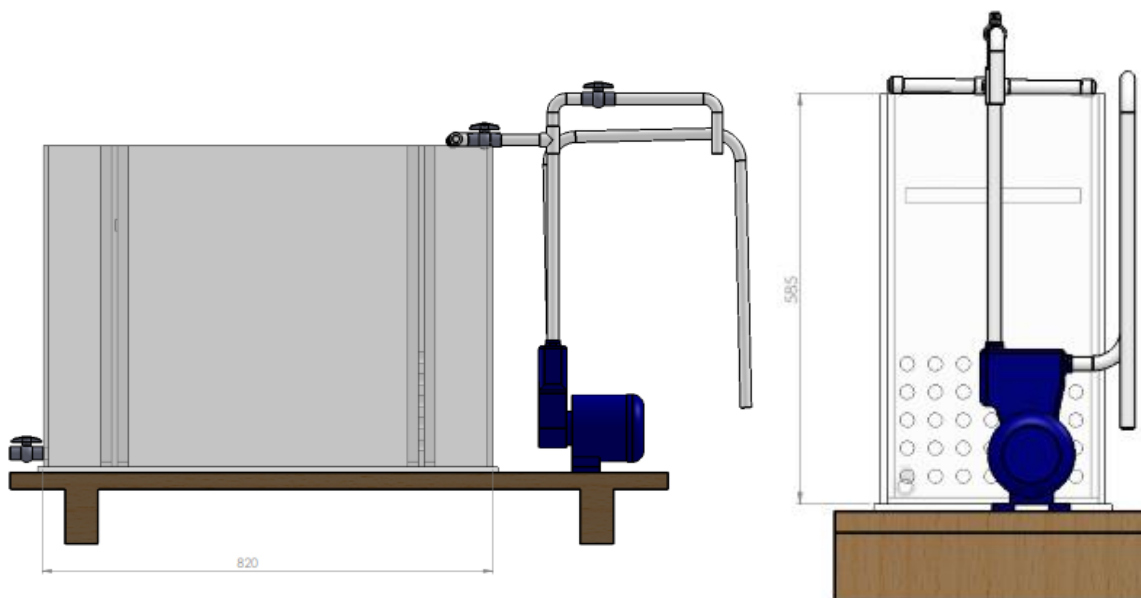
Zeolit dengan distribusi ukuran 4-18 mesh

Adapun kondisi penelitian dijalankan di dalam laboratorium berupa ruang tertutup dengan pengontrolan cahaya dan sirkulasi udara.

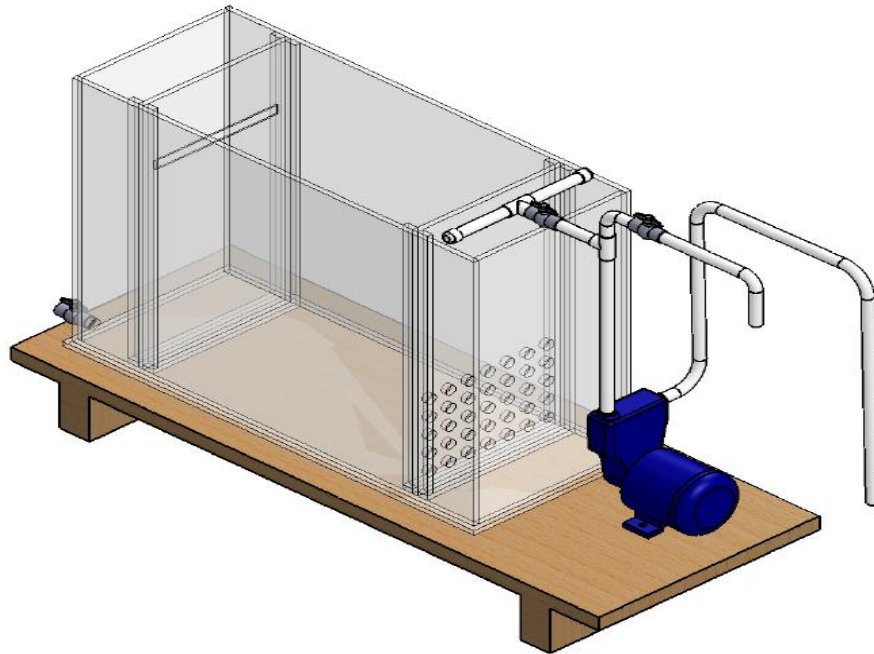
Berikut pada Gambar 1.1, Gambar 1.2 dan Gambar 1.3 disajikan ilustrasi alat yang digunakan dalam penelitian ini.



Gambar1.1 *Subsurface Flow Constructed Wetland* Tampak Atas



Gambar1.2 *Subsurface Flow Constructed Wetland* Tampak Samping



Gambar 1.3 Subsurface Flow Constructed Wetland Tampak Keseluruhan

Performa SSF-CW

Model *Constructed Wetland* sistem SSF ini mempunyai dimensi 820 mm x 320 mm x 585 mm terdiri dari 3 zona, yaitu zona inlet, zona reaksi dan zona outlet. Pada zona reaksi ditanamkan Melati Air dengan luasan 0,0896 gr/cm^2 pada zeolit ukuran 4-18 mesh. Adapun untuk menentukan performa SF-CW dapat

melihat efisiensi *removal* merkuri (Hg). Efisiensi penurunan kadar merkuri dapat ditentukan dengan membandingkan antara penurunan kadar merkuri setelah proses *wetland* terhadap kadar merkuri dalam limbah cair awal. Berikut pada Tabel 1.1 kadar merkuri pada *influen* dan *effluen* reaktor simulasi sistem pengolahan limbah cair tambang emas.

Tabel 1. Hasil uji konsentrasi merkuri per hari

Hari	Detention Time (jam)	Konsentrasi Hg influen (mg/L)	Konsentrasi Hg effluen (mg/L)	% removal
1	0	0	0	0,00
	4	14,94	0,02	99,87
	8	14,94	1,10	92,64
	12	14,94	1,36	90,90
2	0	14,94	0,83	94,44
	4	14,94	1,17	92,17
	8	14,94	1,81	87,88
	12	14,94	0,94	93,71
3	0	14,94	1,03	93,11
	4	14,94	1,50	89,96
	8	14,94	1,89	87,35
	12	14,94	1,52	89,83
Rerata			1,20	91,99

KESIMPULAN

Sistem *Subsurface Flow Constructed Wetland* menggunakan tanaman melati air dan media tanam zeolit efektif dan dapat digunakan untuk mengolah limbah cair tamban gemasyarakat berdasarkan uji performa *Subsurface Flow Constructed Wetland* skala laboratorium mampu menurunkan kadar merkuri hingga kadar *effluen* rata-rata 1,20 ppm dengan prosentase penurunan kadar merkuri sebesar 91,99%.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih ditujukan kepada Departemen Teknik Kimia Universitas Gadjah Mada dan Institut Sains & Teknologi AKPRIND Yogyakarta yang telah memberikan bantuan dana untuk pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. UNEP. *Global Environment Outlook 3, Past, present and future perspectives., 2002.* Earthscan Publications Ltd : London
2. C. Aspinall. Small-scale Mining in Indonesia," *International Institute for Environment and Development, Mining Minerals and Sustainable Development Report.* Jakarta, 2001.
3. Fahmi, F.L dkk. Dampak Pencemaran Merkuri Terhadap Media Geologi Pada Pertambangan Rakyat Di Banyumas, Jawa Tengah. Prosiding Seminar Nasional Kebumihan Ke-7 Universitas Gadjah Mada, 2014.
4. Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 82 Tahun 2001 Tentang Pengelolaan Kualitas Air Dan Pengendalian Pencemaran Air
5. Metcalf and Eddy., *Wastewater Engineering Treatment and Reuse. Fourth Edition.* Mc Graw Hill. California, 2003.
6. Kadlec, R.H and Knight, R.L. *Treatment Wetlands.* CRC Press, Lewis Publisher. Boca Raton Florida, 1996.
7. Suharto dkk. Penurunan Kandungan Logam Pb dan Cr Leachate Melalui Fitoremediasi Bambu Air (*Equisetum Hyemale*) dan Zeolit. *Agrointek* volume 5 no.2, 2011.
8. Caroline, Jenny dan Moa, G.A. Fitoremediasi Logam Timbal (Pb) Menggunakan Tanaman Melati Air (*Echinodorus palaefolius*) pada Limbah Industri Peleburan Tembaga dan Kuningan. Seminar Nasional Sains dan Teknologi Terapan III Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya ISBN 978-602-98569-1-0, 2015.
9. Malik, RA dkk. Potensi Tanaman Air Sebagai Fitoakumulator Logam Kromium Dalam Limbah Cair Tekstil. *Jurnal Riset Teknologi Pencegahan Pencemaran Industri (JRTPPI)* e-ISSN 2503-5010, 2016.

ANALISIS SISTEM PENGELOLAAN SAMPAH KOTA (STUDI KASUS: KOTA SERANG)

Ricky Febriyanto

Sekolah Ilmu Lingkungan Universitas Indonesia Salemba - Gedung C (FKG) Lt. 5 dan 6
Jl. Salemba Raya No. 4 - Jakarta Pusat 10430
rickyfebriyanto_rf@yahoo.com

ABSTRAK

ANALISIS SISTEM PENGELOLAAN SAMPAH KOTA SERANG. Pengelolaan sampah perkotaan adalah bentuk pelayanan publik di sektor kebersihan yang dilaksanakan oleh pemerintah daerah. Karakteristik timbulan sampah perkotaan yang semakin meningkat seiring dengan pertumbuhan penduduk, membutuhkan sistem pengelolaan sampah yang dapat menjamin keberlangsungan di setiap dimensi kehidupan. Saat ini sistem pengelolaan sampah Kota Serang masih dikelola dengan sistem pengelolaan konvensional Kumpul-Angkut-Buang (KAB), sehingga berpotensi menimbulkan dampak negatif pada setiap dimensi kehidupan (sosial, ekonomi dan lingkungan). Untuk mengetahui permasalahan dari kompleksitas sistem pengelolaan sampah Kota Serang, maka digunakan pendekatan yang bersifat multidisiplin dan integralistik. Adapun pendekatan yang digunakan adalah pendekatan kuantitatif, dengan metode permodelan *System Dynamics*. Hasil analisis menunjukkan, karakteristik timbulan sampah Kota Serang ditandai dengan pertumbuhan Jumlah Timbulan Sampah (JTS), cenderung mengalami peningkatan mengikuti pertumbuhan penduduk. Diperkirakan pada tahun 2014, nilai JTS di Kota Serang adalah sebesar 78.409.628,50 kg dengan nilai Timbulan Sampah per Kapita (TSK) sebesar 0,35 kg/jiwa/hari. Hasil simulasi model pada kondisi *Business as Usual* (BAU) menunjukkan terdapat dua permasalahan utama pada sistem pengelolaan sampah Kota Serang. Permasalahan pertama adalah cakupan pelayanan persampahan yang tidak dapat memenuhi ketentuan SPM (Standar Pelayanan Minimal) cakupan pelayanan persampahan perkotaan sebesar 70%. Diprediksi dari tahun 2008-2030 nilai cakupan pelayanan persampahan Kota Serang hanya mencapai 46,37% penduduk per tahun. Permasalahan ke dua adalah pada tahun 2030 TPA Cilowong telah memasuki keadaan jenuh.

Kata Kunci : sistem pengelolaan sampah, system dynamics, model, status keberlanjutan, cakupan pelayanan persampahan, JTS.

ABSTRACT

ANALYSIS OF SOLID WASTE MANAGEMENT SYSTEM IN SERANG CITY. Municipal solid waste management is a form of public service which is provided by local government. Characteristics of municipal waste generation are ever increasing along with population growth, requiring waste management system that can ensure the sustainability in every dimension of life. The current waste management system in the City of Serang is still managed with conventional management systems (end of pipe), that potentially could be negative impact in every dimension of life (social, economic and environmental). In order to know the problems of complexity waste management system in the city of Serang, therefore the appropriate analytical approach is multidisciplinary and integrative. As for the approach used is a quantitative approach, with method a System Dynamics modeling. Result of analysis shows, waste generation characteristics in the city of Serang characterized by the growth of Amount Waste Generation (JTS), tends to increase following the population growth. Estimated in 2014, the value of JTS in Serang city amounted to 78,409,628.50 kg with a value of Waste Generation per Capita (TSK) of 0.35 kg / person / day. Results of model simulations on condition Business as Usual (BAU) shows that there are two main problems in the waste management system in the city of Serang. The first problem is the coverage waste services cannot fulfill the provisions of SPM urban waste service coverage by 70%. Predicted from years 2008-2030 the value waste services coverage in the City of Serang is only reaches 46.37% of the population per year. The second problem is in 2030 TPA Cilowong has entered the state of saturation.

Keywords: waste management system, system dynamics, models, sustainable status, service coverage for waste, JTS.

PENDAHULUAN

Aktivitas kehidupan sehari-hari manusia tidak terlepas dari sampah. Manusia seringkali tidak menyadari bahwa keberadaan sampah (secara kualitas dan kuantitas) turut mengalami perubahan seiring dengan perkembangan peradaban manusia. Kualitas sampah dapat mencerminkan tingkat perkembangan kemampuan intelektual dan teknologi yang digunakan manusia saat itu. Kuantitas sampah

identik dengan sumber penghasil sampah yang erat kaitannya dengan pertumbuhan manusia. Semakin meningkat pertumbuhan manusia maka semakin meningkat pula timbulan sampah.

Masalah sampah di Indonesia telah menjadi permasalahan nasional. Diperkirakan hanya sekitar 60% sampah kota-kota besar di Indonesia yang dapat terangkut ke Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) [1]. Nilai tersebut tidak berbeda secara signifikan dengan hasil penelitian yang

dilakukan Rahim, Nakayama dan Shimaoka [2], terkait pengelolaan sampah di kota-kota besar di Indonesia diantaranya yaitu, DKI Jakarta, Palembang, Medan, Bandung, Bekasi, Makassar, Surabaya, Semarang dan Depok. Menurut mereka, rata-rata jumlah sampah yang dapat terangkut dari kesembilan kota tersebut baru mencapai 69,78%. Sebagian besar kota-kota di Indonesia masih menerapkan paradigma pengelolaan sampah KAB (Kumpul- Angkut- Buang). Akibatnya, TPA sebagai titik akhir pembuangan sampah dituntut untuk dapat menerima sampah dalam jumlah besar tanpa proses pengolahan. Hal inilah yang menjadi sebab terjadi kondisi kegagalan TPA akibat ketidakmampuan TPA dalam menampung sampah maupun mengatasi dampak pencemaran yang ditimbulkannya.

Kota Serang sebagai Ibu Kota Provinsi Banten adalah daerah hasil pemekaran sebagian wilayah dari Kabupaten Serang. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik (BPS), jumlah penduduk Kota Serang pada tahun 2012 adalah 611.897 jiwa, meningkat dari 598.407 jiwa pada tahun 2011. Sebagaimana yang diperlihatkan pada Tabel 1, rata-rata pertumbuhan penduduk Kota Serang dari tahun 2008-2012, mencapai angka pertumbuhan sebesar 5,7% per tahun. Jumlah penduduk Kota Serang yang terus meningkat membawa konsekuensi logis peningkatan aktivitas penduduk, yang berarti juga dapat meningkatkan jumlah timbulan sampah. Hal ini didukung pula melalui penelitian yang dilakukan oleh Hanafiah, ia mengungkapkan bahwa

meningkatnya pertumbuhan penduduk di Kota Serang diikuti dengan peningkatan timbulan sampah yang menyebabkan peningkatan kebutuhan sarana persampahan [3].

Tabel 1 Jumlah Penduduk Kota Serang Tahun 2008-2012.

No	Tahun	Jumlah Penduduk (Jiwa)
1	2008	493.232
2	2009	497.910
3	2010	577.785
4	2011	598.407
5	2012	611.897

Sumber: BPS Kota Serang [4]

Kota Serang saat ini memiliki satu buah sarana TPA, yaitu TPA Cilowong yang terletak di Kecamatan Taktakan sebelah barat Kota Serang. TPA Cilowong pada mulanya didirikan oleh Pemerintah Kabupaten Serang. Semenjak Kabupaten Serang mengalami pemekaran, kepemilikan aset TPA Cilowong menjadi wewenang dari Pemerintah Kota Serang. Berdasarkan data rekapitulasi penerimaan sampah TPA Cilowong (Tahun 1995-2011) yang diperlihatkan pada Tabel 2, menunjukkan bahwa penerimaan sampah di TPA Cilowong setiap tahunnya mengalami peningkatan. Kondisi tersebut apabila tidak disertai dengan pengelolaan sampah yang tepat, maka dapat mengakibatkan TPA akan cepat penuh dan mempersingkat usia TPA.

Tabel 2 Rekapitulasi Penerimaan Sampah yang Masuk ke TPA Cilowong (Tahun 1995-2010).

No	Tahun	Jumlah Sampah Masuk (m ³)	Keterangan
1	1995	32.480	Kabupaten Serang
2	1996	42.840	Kabupaten Serang
3	1997	47.880	Kabupaten Serang
4	1998	52.920	Kabupaten Serang
5	1999	57.960	Kabupaten Serang
6	2000	60.340	Kabupaten Serang
7	2001	63.840	Kabupaten Serang
8	2002	65.870	Kabupaten Serang
9	2003	69.160	Kabupaten Serang
10	2004	73.360	Kabupaten Serang
11	2005	80.430	Kabupaten Serang
12	2006	85.255	Kabupaten Serang
13	2007	89.824	Kabupaten Serang
14	2008	99.373	Kota/Kabupaten Serang
15	2009	136.097	Kota/Kabupaten Serang
16	2010	159.216	Kota/Kabupaten Serang

Sumber: DTK Kota Serang [5].

Adanya bukti keterkaitan antara jumlah penduduk, timbulan sampah, kebutuhan sarana persampahan, dan kapasitas TPA, membuktikan bahwa sistem pengelolaan sampah Kota Serang termasuk kedalam sistem yang kompleks (rumit). Terdapat berbagai unsur penyusun sistem pengelolaan sampah Kota Serang, yang satu sama lain saling berhubungan dan bersifat interdipendensi. Peningkatan jumlah penduduk Kota Serang yang telah dijelaskan sebelumnya, berkorelasi sebagai penyebab terjadinya peningkatan timbulan sampah. Bertambahnya jumlah timbulan sampah, juga berhubungan dengan unsur peningkatan kebutuhan akan sarana dan prasarana. Kondisi meningkatnya kebutuhan tersebut, akan mempengaruhi biaya pengelolaan sampah yang harus direalisasikan oleh Pemerintah Kota Serang. Semakin besar realisasi biaya pengelolaan sampah yang dikeluarkan, maka semakin tinggi pula nilai cakupan pelayanan persampahan yang dapat dicapai. Cakupan pelayanan persampahan pada akhirnya akan mempengaruhi jumlah timbulan sampah yang dapat diangkut menuju TPA.

Belum adanya penelitian terkait kompleksitas sistem pengelolaan sampah Kota Serang, mengakibatkan selama ini kebijakan persampahan yang diambil didasarkan pada pendekatan analisis yang parsial. Padahal kajian yang bersifat parsial memiliki keterbatasan dalam memberikan informasi maupun penjelasan untuk pembuatan keputusan yang bersifat makro, sehingga berpotensi menghasilkan kebijakan yang keliru. Oleh karena itu dibutuhkan pendekatan yang komprehensif dalam menyelesaikan setiap permasalahan sampah yang muncul, sehingga diperoleh sistem kelola sampah yang baik dan berkelanjutan.

Pengelolaan sampah berkelanjutan adalah pengelolaan sampah yang dilaksanakan berdasarkan empat hal yaitu, kemampuan sumber daya, kondisi ekologi, ekonomi serta pengelolaan yang dapat diwariskan untuk generasi masa depan [6]. Klundert, menyatakan bahwa pengelolaan sampah berkelanjutan merupakan pengelolaan sampah terpadu dengan kondisi layak secara prespektif teknis, lingkungan, sosial, ekonomi dan kelembagaan [7]. Serangkaian proses pengelolaan sampah yang berkelanjutan harus dapat memenuhi tiga dimensi paradigma berkelanjutan yaitu ekonomi, sosial dan lingkungan sehingga dapat memenuhi kebutuhan serta kelangsungan untuk generasi di masa mendatang.

Pengelolaan sampah di Kota Serang yang sesuai dengan konsep berkelanjutan, tercantum di dalam peraturan daerah (perda) Kota Serang nomor 10 tahun 2012 Tentang Pengelolaan Sampah. Perda tersebut mengatur

bahwa pengelolaan sampah harus bertujuan untuk menjaga kelestarian fungsi lingkungan hidup, kesehatan masyarakat dan menjadikan sampah sebagai sumber daya [8]. Kenyataan yang ada sekarang di Kota Serang justru sebaliknya. Sistem pengelolaan sampah Kota Serang belum dapat memenuhi tujuan pengelolaan sampah berdasarkan perda Kota Serang nomor 10 tahun 2012. Indikatornya adalah karakteristik timbulan sampah Kota Serang yang semakin meningkat seiring dengan pertumbuhan penduduknya, masih dikelola dengan sistem konvensional (Kumpul-Angkut-Buang). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik timbulan sampah di Kota Serang seiring dengan pertumbuhan penduduknya dan menganalisis model *System Dynamics* (SD) yang komprehensif dan dapat merepresentasikan sistem pengelolaan sampah Kota Serang saat ini, sehingga dapat dipahami permasalahan yang dihadapinya.

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat teoretis dan praktis diantaranya yaitu; Memberikan pengetahuan tentang bagaimana melakukan analisis kebijakan secara teknis dan operasional, menggunakan simulasi model sistem pengelolaan sampah perkotaan berdasarkan metode SD. Selain itu penelitian ini bermanfaat dalam memberikan informasi berbasis komputer melalui aplikasi *software* permodelan, tentang bagaimana dinamika sampah yang terjadi di dalam sistem pengelolaan sampah Kota Serang.

METODOLOGI

Pendekatan yang digunakan pada penelitian ini adalah pendekatan kuantitatif. Untuk tercapainya tujuan dari penelitian ini, maka digunakan dua cara pencapaian, yaitu metode SNI Nomor 19-3964-1995, Tentang Pengambilan dan Pengukuran Contoh Timbulan dan Komposisi Sampah Perkotaan dan metode permodelan *System Dynamics*.

A. Metode SNI Nomor 19-3964-1995

Teknik pengambilan sampel di setiap lokasi sampel dilakukan dengan teknik *simple random sampling*. Diperoleh total sampel sebanyak 261 KK yang tersebar di setiap wilayah administratif Kota Serang (Kecamatan; Cipocok Jaya, Curug, Kasemen, Serang, Taktakan dan Walantaka). Setelah diperoleh lokasi sampel, tahapan selanjutnya adalah pengukuran sampel yang dilakukan dengan cara menimbang berat sampah. Setelah diperoleh berat sampah secara menyeluruh, maka dapat ditentukan nilai sampel Timbulan Sampah per Kapita (TSK) berdasarkan perhitungan menggunakan persamaan [9]:

$$TSK = \frac{Bs}{u}$$

Keterangan:

TSK = Timbulan Sampah per Kapita (kg/jiwa/minggu)

Bs = Berat sampah yang diukur (kg/minggu).

u = Jumlah unit penghasil sampah (jiwa)

Setelah diperoleh nilai TSK, maka dapat dilakukan analisis selanjutnya yaitu analisis jumlah timbulan sampah (JTS). Analisis JTS adalah estimasi jumlah sampah yang dihasilkan di Kota Serang dari sumber sampah permukiman dalam jangka waktu satu tahun. Estimasi ini merupakan langkah awal penelitian yang berfungsi sebagai dasar dari perancangan, dan pengkajian model sistem pengelolaan sampah perkotaan. Mengacu pada peraturan SNI 19-3964-1995, maka estimasi jumlah sampah yang dihasilkan dalam satu tahun dapat dihitung menggunakan persamaan berikut [9]:

$$JTS = TSK \times \text{Penduduk}$$

Keterangan:

JTS = Jumlah timbulan sampah (kg/tahun).

TSK = Timbulan sampah per kapita (kg/jiwa/tahun).

Penduduk = Jumlah manusia yang tercatat sebagai warga atau masyarakat Kota Serang setiap tahun (jiwa).

Analisis selanjutnya adalah analisis kapasitas TPA. Analisis ini, adalah mengestimasi luas lahan ideal yang dibutuhkan dalam menampung sampah. Analisis kapasitas TPA ditentukan berdasarkan rasio pemadatan, yaitu pengurangan volume sampah setelah mengalami proses pemadatan ditempat TPA baik sengaja dipadat maupun pemadatan akibat berat sendiri sampah. Asumsi rasio sebesar 1 bagian tanah penutup berbanding 4 bagian sampah, maka kebutuhan lahan ideal untuk TPA *landfill* dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$V = 1,25 \times \frac{R}{D} \times \left(1 - \frac{P}{100}\right)$$

dimana:

$$A = \frac{VN}{d}$$

Keterangan:

112

V = Volume sampah dan tanah penutup per jiwa per tahun (m³/jiwa/tahun)

R = Laju timbulan sampah per orang per tahun (kg/jiwa/tahun)

D = Densitas sampah sebelum dipadatkan yang tiba di TPS/TPA (kg/m³)

P = Persentase pengurangan volume karena pemadatan

A = Luas lahan yang diperlukan (m²/tahun)

N = Jumlah penduduk yang dilayani (jiwa)

d = Tinggi/kedalaman sampah dan tanah penutup

B. Metode Permodelan *System Dynamics*.

Penggunaan metode permodelan diawali dengan tahapan deskriptif analitik yaitu proses pemahaman sistem pengelolaan sampah Kota Serang yang diuraikan kedalam bentuk deskripsi sistem. Proses deskripsi sistem dilakukan melalui penyusunan informasi dan data yang diperoleh dari berbagai sumber baik dari observasi lapangan maupun dari berbagai sumber kajian ilmiah. Hasil penyusunan informasi dan data kemudian diinterpretasikan secara sistematis dan digeneralisasi kedalam bentuk model diagram hubungan sebab-akibat antara variabel-variabel utama penyusun sistem pengelolaan sampah Kota Serang. Adapun Model diagram hubungan sebab-akibat yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Causal Loop Diagram* (CLD).

Setelah diperoleh model CLD, pekerjaan selanjutnya adalah mengembangkan CLD ke dalam model diagram alir berbasis komputer, berupa *Stock and Flow Diagrams* (SFD). Proses transformasi CLD ke SFD berfungsi menganalisis secara kuantitatif model sistem pengelolaan sampah Kota Serang, sehingga dihasilkan data numerik yang lebih spesifik dari setiap komponen penyusun model. Adapun program komputer yang digunakan untuk membangun SFD pada penelitian ini, adalah menggunakan bantuan perangkat lunak permodelan *Powersim Studio 8 Enterprise*, dengan lisensi berasal dari Badan Koordinasi Survei dan Pemetaan Nasional (Bakosurtanal).

Berdasarkan hasil pembuatan model SFD, maka dilakukan teknik simulasi yaitu proses operasionalisasi model SFD secara simultan dalam jangka waktu tertentu pada kondisi skenario model *Business as Usual* (BAU). Menurut Soesilo dan Karuniasa, Simulasi memberikan gambaran kinerja sistem,

baik kinerja sistem sampai dengan saat ini maupun prediksi sistem hingga periode waktu tertentu [10].

Simulasi model SFD menghasilkan data numerik dari setiap komponen model, yang ditampilkan dalam bentuk tabel maupun grafik waktu. Beberapa data komponen model yang akan ditampilkan pada tahapan ini adalah data penduduk, jumlah sampah TPA, realisasi biaya pengelolaan sampah dan PDRB. Setelah diperoleh data numerik dari setiap komponen model, maka langkah selanjutnya adalah memvalidasi model.

Model dinyatakan valid apabila secara struktur model telah sesuai dengan informasi dan data (kondisi eksisting Kota Serang sebagai wilayah penelitian, karakteristik timbulan sampah, pelayanan persampahan Kota Serang dan landasan teoretis ilmiah) serta secara statistik ditandai dengan nilai penyimpangan model berada dibawah ketentuan nilai perhitungan validitas nilai *Absolute Mean Errors* (AME). Ketentuan perhitungan validitas nilai AME, yaitu nilai $AME \leq 10\%$ untuk penelitian di dalam laboratorium (hampir semua variabel dapat dikontrol), dan nilai $AME \leq 30\%$ untuk penelitian lapangan (dimana hampir semua variabel tidak dapat dikontrol). Berikut rumus AME yang digunakan untuk menghitung penyimpangan tersebut [11]:

$$AME = \frac{|\bar{X}_s - \bar{X}_e|}{\bar{X}_e} \times 100\%$$

Nilai \bar{X}_s adalah nilai rata-rata dari data hasil simulasi, nilai \bar{X}_e adalah nilai rata-rata dari data empirik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Karakteristik Timbulan Sampah di Kota Serang.

Bertambahnya penduduk Kota Serang setiap tahunnya, menggambarkan semakin banyak orang yang menetap dan bertempat

tinggal di wilayah permukiman Kota Serang. Hal ini mengindikasikan semakin tinggi aktivitas yang berpotensi menghasilkan sampah di wilayah permukiman. Hasil analisis timbulan sampah Kota Serang dengan menggunakan metode SNI 19-3964-1995, menghasilkan nilai rata-rata timbulan sampah Kota Serang per kapita pada tahun 2014 adalah sebesar 0,35 kg/jiwa/hari. Nilai ini menjelaskan bahwa, diperkirakan setiap satu orang penduduk Kota Serang menghasilkan sampah dalam satu hari sebesar 0,35 kg, atau setara dengan volume sampah sebesar 1,75 liter. Secara lebih terperinci hasil analisis terkait pengukuran contoh timbulan sampah di seluruh kecamatan Kota Serang dapat dilihat pada Tabel 3.

Berdasarkan data pada Tabel 3, diperoleh nilai TSK terbesar berasal dari Kecamatan Serang, yaitu sebesar 0,42 kg/jiwa/hari. Diurutan selanjutnya adalah Kecamatan Cipocok Jaya dengan nilai TSK sebesar 0,34 kg/jiwa/hari. Untuk beberapa kecamatan lainnya diperoleh nilai TSK yang tidak berbeda jauh, yaitu berkisar antara 0,28-0,30 kg/jiwa/hari. Nilai TSK membuktikan bahwa jumlah sampah yang dihasilkan di suatu wilayah sangat dipengaruhi oleh jumlah penduduknya. Semakin tinggi jumlah penduduk di suatu wilayah, maka semakin besar potensi sampah yang dihasilkan setiap orangnya.

Tabel 3. Hasil Analisis Pengukuran Timbulan Sampah di Setiap Kecamatan Kota Serang Tahun 2014.

No	Kecamatan	Jiwa	Berat Sampah (kg/hari)
1	Cipocok Jaya	147	49,93
2	Serang	349	145,98
3	Kasemen	165	50,05
4	Walantaka	150	45,28
5	Taktakan	119	33,78
6	Curug	76	23,05
Total		1006	348,08
TSK		0,35 kg/jiwa/tahun	
TSK (dalam tahun)		127,75 kg/jiwa/tahun	

Setelah diperoleh nilai TSK Kota Serang, selanjutnya dilakukan analisis estimasi Jumlah Timbulan Sampah (JTS) dalam jangka waktu satu tahun. Hasil perhitungan menunjukkan, bahwa nilai JTS di Kota Serang pada tahun 2014 sebesar 78.409.628,50 kg, atau setara dengan jumlah volume sampah yang dihasilkan setiap harinya sebesar 1.074,10 m³/hari. Jumlah timbulan sampah yang dihasilkan di Kota Serang sebagian besar dikelola pemerintah dengan cara dikumpulkan, diangkut dan ditimbun di TPA Cilowong. Apabila digunakan asumsi bahwa volume sampah Kota Serang yang masuk ke TPA Cilowong setiap harinya berjumlah sekitar 500 m³/hari [12], maka dapat diperkirakan cakupan pelayanan persampahan Pemerintah Kota Serang pada tahun 2014, baru dapat mencapai agregat sebesar 46,55%.

Setelah diperoleh nilai jumlah sampah yang dihasilkan dan agregat cakupan pelayanan persampahan Kota Serang, maka dapat dilakukan analisis kapasitas TPA Cilowong. Diketahui bahwa pada tahun 2014 nilai luas lahan ideal yang dibutuhkan TPA Cilowong untuk menampung sampah yang dihasilkan dari jumlah penduduk terlayani, adalah seluas 1,37 ha/tahun. Artinya, untuk setiap jumlah sampah yang dihasilkan sebesar 36.500.219 kg, maka diperlukan luas lahan TPA seluas 1,37 ha, atau setara dengan nilai 2,66 ton/m². Pada analisis selanjutnya nilai ini, akan digunakan sebagai standar untuk menentukan daya tampung dan usia TPA Cilowong.

Analisis Model Sistem Pengelolaan Sampah Kota Serang.

Untuk memudahkan pemahaman ruang lingkup sistem pengelolaan sampah Kota Serang, maka dibuat struktur CLD model sistem pengelolaan sampah Kota Serang, yang dibagi kedalam tiga sub-sistem. Sub-sistem pertama adalah dimensi sosial, yang diwakili oleh komponen sosial, yaitu penduduk dan cakupan pelayanan persampahan. Sub-sistem kedua

adalah dimensi lingkungan, yang diwakili oleh komponen lingkungan, seperti sampah kota, volume sampah terangkut, sampah TPA, produksi LFG dan emisi CH₄.

Untuk sub-sistem ketiga adalah dimensi ekonomi, yang diwakili oleh komponen ekonomi, seperti PDRB, realisasi biaya pengelolaan sampah dan total biaya sosial. Ketiga sub-sistem ini, merupakan bentuk generalisasi (penyederhanaan) dari kompleksitasnya hubungan antarkomponen, yang terdapat pada kondisi eksisting Kota Serang sebagai wilayah penelitian, karakteristik timbulan sampah dan pelayanan persampahan Kota Serang.

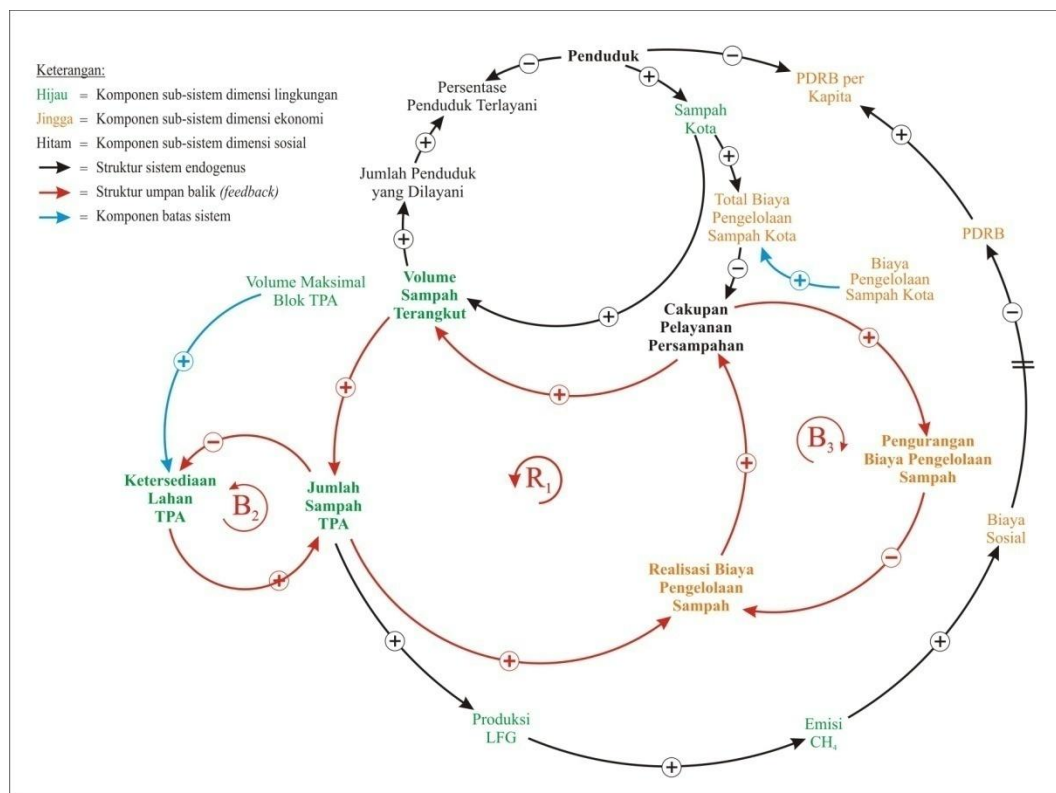
Struktur CLD model sistem pengelolaan sampah Kota Serang, merupakan integrasi hubungan sebab-akibat dari setiap komponen pembentuk sub-sistem. Konsep hubungan sebab-akibat antarsub-sistem, diawali dari pertemuan antara sub-sistem dimensi sosial dengan sub-sistem dimensi lingkungan. Pertemuan tersebut, terbentuk melalui hubungan sebab-akibat antara komponen penduduk dengan komponen sampah Kota. Berdasarkan kondisi Kota Serang, dalam hal ini kondisi demografi dan karakteristik timbulan sampah, maka komponen penduduk dan sampah Kota Serang membentuk hubungan sebab-akibat searah (bergerak ke arah yang sama). Hubungan tersebut, merupakan interpretasi dari kondisi peningkatan penduduk Kota Serang, yang mengakibatkan bertambahnya sampah Kota Serang.

Pertemuan sub-sistem dimensi lingkungan dengan sub-sistem dimensi ekonomi, terbentuk melalui hubungan sebab-akibat antara komponen jumlah sampah TPA dengan realisasi biaya pengelolaan sampah. Berdasarkan kondisi Kota Serang, dalam hal ini kondisi ekonomi dan karakteristik timbulan sampah, maka komponen jumlah sampah TPA dan realisasi biaya pengelolaan sampah Kota Serang membentuk hubungan sebab-akibat searah. Hubungan

tersebut, merupakan interpretasi dari kondisi peningkatan jumlah sampah TPA Cilowong, yang mengakibatkan meningkatnya realisasi biaya pengelolaan sampah.

Pertemuan sub-sistem dimensi ekonomi dengan sub-sistem dimensi sosial terbentuk melalui hubungan sebab-akibat antara komponen realisasi biaya pengelolaan sampah dengan cakupan pelayanan persampahan. Berdasarkan hasil pengamatan beserta kajian literasi, terkait kondisi ekonomi dan pelayanan persampahan Kota Serang, diketahui bahwa komponen realisasi biaya pengelolaan sampah dengan

cakupan pelayanan persampahan membentuk hubungan sebab-akibat searah. Hubungan sebab-akibat searah dari komponen realisasi biaya pengelolaan sampah dengan cakupan pelayanan persampahan, merupakan interpretasi dari kondisi peningkatan realisasi biaya pengelolaan sampah, mengakibatkan cakupan pelayanan persampahan Kota Serang juga mengalami peningkatan. Secara lengkap hubungan sebab-akibat dari setiap komponen pembentuk sub-sistem dimensi lingkungan, ekonomi dan sosial pada model sistem pengelolaan sampah Kota Serang, dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Struktur CLD Model Sistem Pengelolaan Sampah Kota Serang.

Gambar 1 memperlihatkan bahwa struktur CLD model sistem pengelolaan sampah Kota Serang, relatif membentuk sistem endogenus. Hubungan sebab akibat antarkomponen penyusun sistem masih tetap berada didalam batas sistem. Adapun batasan sistem dibangun berdasarkan tujuan penelitian ini. Di dalam struktur CLD, batasan sistem direpresentasikan oleh komponen volume maksimal blok TPA dan biaya pengelolaan sampah kota. Nilai kedua komponen tersebut, tidak ditentukan oleh perilaku dari sistem, namun sebagai bagian dari sebuah sistem, maka nilainya dapat diturunkan dari bagian lain dari suatu sistem.

Struktur sistem endogenus model sistem pengelolaan sampah Kota Serang merupakan interpretasi dari model SD, karena fenomena strukturnya membentuk loop umpan balik (*feedback structure*). Terbentuk tiga loop umpan balik dalam model sistem pengelolaan sampah Kota Serang, antara lain yaitu:

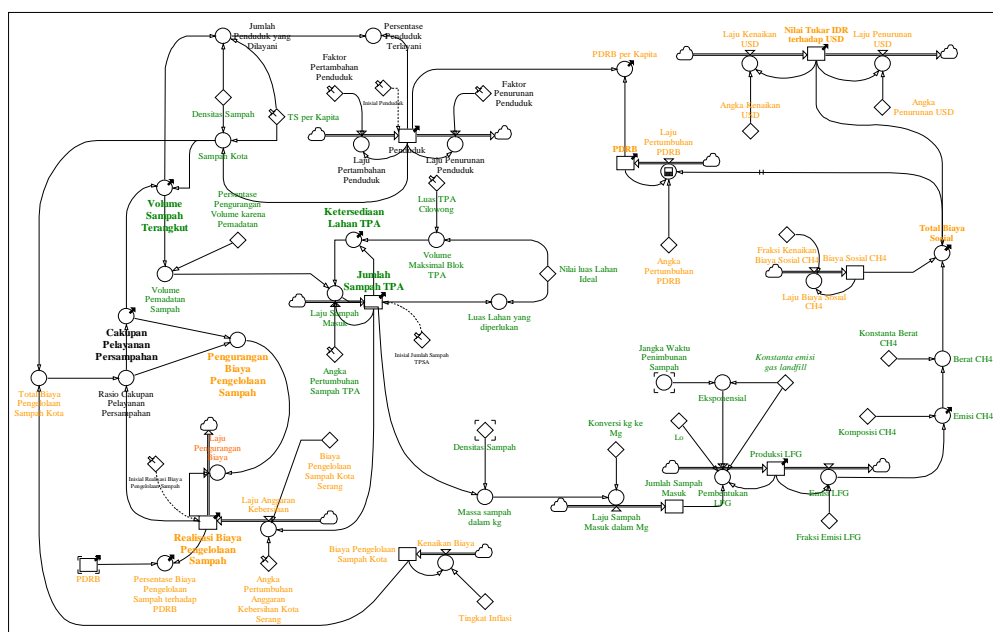
1. Loop umpan balik positif (*reinforcement*) R1 = Volume Sampah Terangkut → Jumlah Sampah TPA → Realisasi Biaya Pengelolaan Sampah → Cakupan Pelayanan Persampahan → Volume Sampah Terangkut.

2. Loop umpan balik negatif (*balancing*) B2 = Jumlah Sampah TPA → Ketersediaan Lahan TPA → Jumlah Sampah TPA.
3. Loop umpan balik negatif (*balancing*) B3 = Realisasi Biaya Pengelolaan Sampah → Cakupan Pelayanan Persampahan → Pengurangan Biaya Pengelolaan Sampah → Realisasi Biaya Pengelolaan Sampah.

Operasional model, dilakukan dengan cara menterjemahkan struktur CLD kedalam struktur SFD menggunakan bantuan perangkat lunak permodelan *Powersim Studio 8 Enterprise*. Struktur CLD model sistem pengelolaan sampah Kota Serang merupakan bagian dari struktur SFD model tersebut. Proses menterjemahkan struktur

CLD kedalam struktur SFD adalah tahapan pengembangan model konseptual dengan cara menambahkan komponen model secara lebih terperinci (*detail complexity*).

Penambahan komponen model secara terperinci pada penelitian ini, dilakukan dengan menambahkan sebanyak 45 komponen dari jumlah awal komponen pada struktur CLD, yaitu sebanyak 18 komponen. Hal ini dapat diartikan bahwa, terdapat 63 komponen penyusun model pada struktur SFD model sistem pengelolaan sampah Kota Serang. Secara lebih terperinci, struktur SFD model sistem pengelolaan sampah Kota Serang, dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Struktur SFD Model Sistem Pengelolaan Sampah Kota Serang.

Untuk membuktikan tingkat kepercayaan dari model yang telah dibangun, maka dilakukan uji validasi dengan menggunakan perhitungan standar uji statistik AME. Hasil uji validasi menunjukkan bahwa persentase penyimpangan data (nilai AME) untuk komponen penduduk adalah 3,95%, untuk jumlah sampah TPA adalah 2,77%, untuk realisasi biaya pengelolaan sampah adalah 1,87% dan untuk PDRB adalah 4,17%.

Secara keseluruhan, nilai AME dari masing-masing komponen menunjukkan nilai yang berada dibawah batas ketentuan validitas perhitungan nilai AME. Berdasarkan hasil uji validasi tersebut, maka dapat dinyatakan bahwa model sistem pengelolaan sampah Kota Serang yang telah dibangun, mampu menirukan kinerja sistem sesungguhnya secara komprehensif dan valid untuk dilanjutkan. Setelah diperoleh model

yang telah dinyatakan valid, maka tahapan selanjutnya adalah simulasi model lanjutan. Simulasi ini, dilakukan dengan cara memproyeksikan model dalam jangka waktu simulasi 22 tahun kedepan (sampai dengan tahun 2030) berdasarkan skenario *Business as Usual* (BAU).

Penentuan jangka waktu simulasi dilakukan berdasarkan asumsi, bahwa dinamika pembangunan Kota Serang tidak akan mengalami perubahan signifikan hingga tahun 2030, sehingga tidak terlalu mempengaruhi kondisi sistem pengelolaan sampah Kota Serang. Dinamika pembangunan tersebut mengacu pada kebijakan perda Kota Serang No. 6 tahun 2011, Tentang Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) Kota Serang Tahun 2010-2030 [13].

Prediksi perilaku model pada kondisi BAU memperlihatkan jumlah sampah TPA Cilowong dari tahun ke tahun mengalami peningkatan. Semakin meningkat jumlah sampah TPA mengakibatkan semakin menurun nilai ketersediaan lahan TPA, yang pada akhirnya akan menentukan umur TPA tersebut. Nilai ketersediaan lahan adalah perbandingan antara nilai jumlah sampah TPA dengan volume

maksimal blok TPA. Nilai ini berada pada rentang nilai 0 sampai dengan 1. Nilai 0 dianalogikan sebagai kondisi lahan TPA Cilowong tersedia untuk menampung sampah. Untuk nilai 1 dianalogikan sebagai kondisi lahan TPA Cilowong sudah tidak memadai untuk menampung sampah. Hasil simulasi model pada kondisi BAU secara lebih terperinci diperlihatkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Simulasi Kondisi BAU Persentase Biaya Pengelolaan Sampah terhadap PDRB, PDRB per Kapita, Pertumbuhan PDRB per Kapita, Cakupan Pelayanan Persampahan, Jumlah Sampah TPA, dan Ketersediaan Lahan TPA dari Tahun 2008-2030.

No	Tahun	PDRB per Kapita	Cakupan Pelayanan Persampahan	Jumlah Sampah TPA	Ketersediaan Lahan TPA
		(Rupiah/Jiwa)	(%)	(m ³)	
1	2008	8.827.768,60	34,73	552.919,20	0,29
2	2009	9.504.075,84	36,50	650.753,38	0,34
3	2010	10.232.195,89	38,46	753.712,11	0,40
4	2011	11.016.050,82	40,51	860.214,14	0,45
5	2012	11.859.878,57	42,58	968.278,43	0,51
6	2013	12.768.248,53	44,59	1.075.665,87	0,57
7	2014	13.746.086,43	46,48	1.180.066,46	0,62
8	2015	14.798.701,10	48,17	1.279.305,48	0,68
9	2016	15.931.813,39	49,62	1.371.534,18	0,73
10	2017	17.151.587,36	50,78	1.455.372,55	0,77
11	2018	18.464.663,82	51,63	1.529.982,52	0,81
12	2019	19.878.196,31	52,16	1.595.066,93	0,84
13	2020	21.399.889,77	52,36	1.650.805,74	0,87
14	2021	23.038.042,00	52,25	1.697.751,54	0,90
15	2022	24.801.588,37	51,84	1.736.709,30	0,92
16	2023	26.700.149,85	51,16	1.768.621,34	0,93
17	2024	28.744.084,88	50,24	1.794.471,34	0,95
18	2025	30.944.545,26	49,11	1.815.213,28	0,96
19	2026	33.313.536,47	47,80	1.831.725,32	0,97
20	2027	35.863.982,76	46,35	1.844.784,96	0,98
21	2028	38.609.797,30	44,78	1.855.060,18	0,98
22	2029	41.565.957,85	43,12	1.863.111,47	0,98
23	2030	44.748.588,32	41,40	1.869.400,48	0,99

Berdasarkan hasil analisis penelitian yang ditunjukkan pada Tabel 3, dapat dipahami bahwa terdapat dua permasalahan utama pada sistem pengelolaan sampah Kota Serang, yaitu:

1. Permasalahan Cakupan Pelayanan Persampahan.

Hasil simulasi model selama periode tahun 2008-2030 menunjukkan pemerintah Kota Serang tidak dapat memenuhi ketentuan SPM

cakupan pelayanan persampahan perkotaan sebesar 70%. Rata-rata cakupan pelayanan persampahan Kota Serang hanya mencapai 46,37% per tahun. Kondisi ini berbeda dengan kebijakan Rencana Pembangunan Jangka Menengah Daerah (RPJMD) Kota Serang tahun 2014-2018, yang memprediksi bahwa pada tahun 2017 target cakupan pelayanan persampahan Kota Serang sudah dapat mencapai sebesar 70% [14]. Target kebijakan

Pemerintah Kota Serang tersebut dinilai peneliti sebagai kebijakan yang berlebihan dan sulit untuk diwujudkan.

Adanya kecenderungan pemerintah dalam merancang pengambilan kebijakan target cakupan pelayanan persampahan, dilakukan dengan cara berpikir linear tidak komprehensif. Pengelolaan sampah di Kota Serang tidak dilihat pemerintah sebagai suatu sistem yang kompleks, terdiri atas berbagai komponen penyusun. Hal ini mengakibatkan penentuan nilai cakupan pelayanan persampahan, hanya dilihat dari faktor penyebab yang dekat dengan nilai tersebut, padahal besar kemungkinan faktor penyebab berada jauh dari nilai cakupan pelayanan persampahan. Sejalan dengan pernyataan Sterman, yang menyatakan bahwa dalam sistem yang kompleks sebab dan akibat dapat berada jauh dalam ruang dan waktu [15]. Pemerintah juga tidak memperhitungkan respon jangka panjang dari nilai cakupan pelayanan persampahan sebagai bagian komponen sistem pengelolaan sampah, yang dapat berbeda dengan respon jangka pendeknya. Cakupan pelayanan persampahan sebagai komponen penyusun sistem, nilainya dapat mempengaruhi dan dipengaruhi oleh satu ataupun lebih komponen sistem lainnya, baik secara langsung maupun tidak langsung.

Nilai cakupan pelayanan persampahan dipengaruhi oleh nilai realisasi biaya pengelolaan sampah Kota Serang. Hingga tahun 2030, diketahui bahwa nilai realisasi biaya pengelolaan sampah Kota Serang tidak dapat menutupi kebutuhan biaya pengelolaan sampahnya. Kondisi ini terjadi akibat jumlah sampah Kota Serang dan biaya pengelolaannya yang semakin meningkat tidak diimbangi dengan peningkatan realisasi biaya pengelolaan sampah yang dikeluarkan oleh pemerintah. Oleh karena itu, diperlukan upaya pemerintah untuk dapat melakukan perimbangan dana realisasi biaya pengelolaan sampah sehingga dapat memenuhi target cakupan pelayanan persampahan.

Upaya perimbangan dana dapat dilakukan pemerintah dengan cara meningkatkan penerimaan daerah dari sektor kebersihan. Berdasarkan hasil perhitungan, pertumbuhan PDRB per kapita Kota Serang tergolong tinggi, yaitu 7,66% per tahun. Kondisi ini mengindikasikan adanya potensi peningkatan penerimaan daerah dari sektor kebersihan, dengan cara mengoptimalkan peran serta masyarakat untuk memenuhi kewajiban membayar retribusi kebersihan. Walaupun dilakukan optimalisasi penerimaan retribusi

kebersihan, namun sebaiknya pemerintah tidak hanya bergantung pada cara tersebut, karena pada dasarnya sifat kenaikan pungutan akan dinilai masyarakat sebagai beban.

Pemerintah harus dapat mengembangkan potensi sampah menjadi sumber daya yang dapat menghasilkan nilai ekonomi. Sampah seharusnya tidak hanya dianggap sebagai objek belanja keuangan daerah, namun dapat menjadi salah satu sumber Pendapatan Asli Daerah (PAD). Adanya penambahan PAD dari pengelolaan sampah akan menjadi nilai tambah pendanaan di sektor kebersihan, sehingga secara otomatis dapat mendorong peningkatan cakupan pelayanan persampahan tanpa membebankan masyarakat.

2. Permasalahan Jumlah Sampah TPA.

Jumlah sampah TPA Cilowong yang terus terakumulasi mengakibatkan pada tahun tertentu hasil simulasi akan menunjukkan nilai ketersediaan lahan TPA sebesar 1, artinya TPA dinyatakan penuh dan berhenti beroperasi. Pada kondisi inilah, dapat diperkirakan seberapa lama umur TPA mampu beroperasi. Diperkirakan pada tahun 2030 TPA Cilowong sudah memasuki keadaan jenuh yaitu kondisi berhenti beroperasi. Apabila dihitung berdasarkan asumsi TPA Cilowong pertama kali beroperasi menggunakan sistem *Controlled Landfill* (CL) tahun 2013, maka dapat diprediksi umur TPA Cilowong adalah selama 17 tahun. Hasil prediksi tersebut, tidak berbeda jauh dengan perkiraan umur TPA Cilowong yang dihasilkan oleh DTK Kota Serang. Menurut DTK Kota Serang (2012), diperkirakan bahwa TPA Cilowong dengan sistem CL akan mampu beroperasi selama 15 tahun hingga tahun 2026, kecuali ada peningkatan teknologi pengelolaan sehingga dapat memperpanjang umur TPA.

Peningkatan jumlah sampah TPA, menggambarkan kondisi timbunan sampah di TPA Cilowong yang terus bertambah. Timbunan sampah tersebut terakumulasi dan menghasilkan emisi CH_4 , yang berpotensi menimbulkan dampak negatif. TPA Cilowong sebagai asal penghasil emisi CH_4 , memiliki luas lahan seluas 14,2 ha. Luas ini diestimasi mampu menampung volume sampah hingga mencapai 1.891.617,19 m^3 . Volume maksimal blok TPA Cilowong yang mampu menampung sampah dalam jumlah besar, membawa konsekuensi menghasilkan emisi CH_4 dalam jumlah yang besar.

Keberadaan gas CH_4 di TPA Cilowong, seharusnya dapat dimanfaatkan Pemerintah Kota Serang, sebagai potensi sumber energi

terbaharukan, seperti yang dilakukan di Ontario Kanada. Pemerintah Ontario melalui Kementerian Lingkungan Hidupnya, mengeluarkan peraturan untuk setiap TPA dengan kapasitas total sampah lebih dari 1.500.000 m³, diwajibkan membangun fasilitas berupa sistem pembakaran, penangkapan atau pemanfaatan gas metana menjadi energi listrik [16]. Mengingat kapasitas total sampah TPA Cilowong lebih dari 1.500.000 m³ dan besarnya potensi emisi CH₄ yang akan dihasilkan, sebaiknya pemerintah Kota Serang dapat menerapkan kebijakan serupa untuk membangun fasilitas pemanfaatan gas metana di TPA Cilowong.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang telah disampaikan sebelumnya, maka dapat disimpulkan bahwa karakteristik timbulan sampah Kota Serang ditandai dengan pertumbuhan Jumlah Timbulan Sampah (JTS), cenderung mengalami peningkatan mengikuti pertumbuhan penduduk dan tingkat kepadatan penduduk. Diperkirakan pada tahun 2014, nilai JTS di Kota Serang adalah sebesar 78.409.628,50 kg dengan nilai TSK sebesar 0,35 kg/jiwa/hari. Sistem pengelolaan sampah Kota Serang yang dinilai berdasarkan penilaian indikator cakupan pelayanan persampahan dan Jumlah Sampah TPA dari tahun 2008-2030, yaitu sebesar 46,37% per tahun dan 1.891.617,19 m³, menunjukkan bahwa sistem pengelolaan sampah Kota Serang tidak berkelanjutan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, sangatlah sulit bagi penulis untuk menyelesaikan makalah ini. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Dr. dr. Tri Edhi Budhi Soesilo, M.Si. selaku Wakil Direktur Sekolah Ilmu Lingkungan Universitas Indonesia, atas bimbingan, arahan, serta motivasi yang diberikan dan ditanamkan kepada saya untuk karya ini.
2. Dr. Udi Syahnoedi Hamzah, MM, selaku Dosen pada Program Studi Kajian Ilmu Lingkungan Universitas Indonesia, atas bimbingan, arahan, serta motivasi yang diberikan sehingga karya ini menjadi lebih baik.
3. Dr. Hayati Sari Hasibuan, ST., MT, selaku Dosen pada Program Studi Kajian Ilmu Lingkungan Universitas Indonesia, atas saran

dan masukan yang diberikan sehingga karya tulis ini dapat di seminarikan.

4. Wezia Berkademi, SE., M.Si, selaku staf peneliti pada Program Studi Kajian Ilmu Lingkungan Universitas Indonesia, atas bantuan dan kerjasamanya sehingga segala jenis proses administrasi yang berkaitan dengan karya ini menjadi lebih mudah dan lebih lancar.

DAFTAR PUSTAKA

1. Damanhuri, E., Padmi, T. *Pengelolaan Sampah*. Bandung Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan Institut Teknologi Bandung, (2010).
2. Rahim Irwan. R., Nakayama H, Shimaoka T. Cost Analysis of Municipal Solid Waste Management in Major Indonesian Cities. *Journal of Japan Society of Civil Engineers*. Vol. 68 (2012).
3. Hanafiah, M. Kesesuaian Lokasi TPS dari Aspek Teknis dan Pendapat Masyarakat Di Kota Serang. *Tesis*. Program Magister Teknik Pembangunan Wilayah dan Kota. Universitas Diponegoro, (2008).
4. Badan Pusat Statistik (BPS) Kota Serang. *Kota Serang Dalam Angka Tahun 2012*. Kota Serang: BPS, (2013).
5. Dinas Tata Kota (DTK) Kota Serang. *Dokumen ANDAL (Analisis Mengenai Dampak Lingkungan) Rencana Kegiatan Pembangunan TPAS Cilowong*. Kota Serang: DTK Kota Serang, (2012).
6. Kristiyanto, T. Pengelolaan Persampahan Berkelanjutan Berdasarkan Peran Serta Masyarakat Kota Kebumen. *Tesis*. Program Pasca Sarjana Universitas Diponegoro, (2007).
7. Klundert, A. Van de., Anschütz, J. *Integrated Sustainable Waste Management - The Concept*. Netherlands: Nieuwehaven 2012801 CW Gouda, (2001).
8. Peraturan Daerah Kota Serang Nomor 10 tahun 2012 *Tentang Pengelolaan Sampah*.
9. Soesilo, B., Karuniasa, M. *Permodelan System Dynamics Untuk Berbagai Bidang Ilmu Pengetahuan, Kebijakan Pemerintah dan Bisnis*. Jakarta: Fakultas Ekonomi Universitas Indonesia, (2014).
10. Badan Standardisasi Nasional (BSN). SNI No. 19-3964-1995 *Tentang Metode Pengambilan dan Pengukuran Contoh Timbulan dan Komposisi Sampah Perkotaan*, (1995).
11. Muhammadiyah, E. Aminullah, B. Soesilo. *Analisis Sistem Dinamis: Lingkungan Hidup, Sosial, Ekonomi, Manajemen*. Jakarta: UMI Press, (2001).

12. Radar Indonesia News. *TPAS Cilowong : Butuh Perhatian Khusus Terkait Areal Lahan Yang Semakin Menyempit*. Radar Indonesia News:
<http://www.radarindonesianews.com/2015/04/tpas-cilowong-butuh-perhatian-khusus.html>. 12 Juli 2015, pk. 21.20 WIB., (2015).
13. Peraturan Daerah Kota Serang No. 6 tahun 2011, *Tentang Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) Kota Serang Tahun 2010-2030*.
14. Badan Lingkungan Hidup Daerah (BLHD) Kota Serang. *Rencana Strategis Badan Lingkungan Hidup Daerah Kota Serang 2014-2018*. Kota Serang: BLHD, (2014).
15. Sterman, Jhon D. *Business Dynamics Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. USA: Jeffrey J. Shelsfud. The McGraw-Hill Companies, Inc. AU rights reserved, (2000).
16. Ontario Ministry of The Environment. *Landfill Gas Capture A Guideline on the Regulatory and Approval Requirements for Landfill Gas Capture Facilities*. Ontario: Canada, (2008).

KUALITAS LIMBAH DOMESTIK DAN PARTISIPASI MASYARAKAT YANG PEDULI LINGKUNGAN DI PERUMAHAN PERMATA DEPOK KLAS TER MIRAH 1 DAN 2

Melania Hanny Aryantie, Sri Unon Purwati, Oktaria Diah Pitalokasari
Pusat Penelitian dan Pengembangan Kualitas dan Laboratorium Lingkungan, BLI, KLHK
Kawasan Puspiptek Gedung 210, Tangerang Selatan 15310
melania.hanny@gmail.com

ABSTRAK

KUALITAS LIMBAH DOMESTIK DAN PARTISIPASI MASYARAKAT YANG PEDULI LINGKUNGAN DI PERUMAHAN PERMATA DEPOK KLAS TER MIRAH 1 DAN 2. Berdasarkan pada tingkat kepadatan dan laju pertumbuhan penduduk yang pesat dewasa ini maka keberadaan limbah domestik di lingkungan akan berpotensi menjadi ancaman serius terhadap kualitas lingkungan perairan. Kepadatan penduduk yang terkonsentrasi di kawasan perkotaan dan penyangganya menjadikan kedua kawasan sebagai penyumbang utama pencemaran sungai yang disebabkan oleh limbah domestik. Akan tetapi kedua kawasan itu juga memiliki potensi berupa masyarakat yang mau berpartisipasi mengelola limbah yang dihasilkan. Dengan demikian selain sebagai sumber pencemar, masyarakat juga mampu membersihkan limbah yang diproduksi. Tulisan ini bertujuan untuk menyajikan keterkaitan antara partisipasi masyarakat permukiman di kawasan penyangga kota dalam mengelola limbah domestik rumah tangga dengan kualitas limbah cair yang dihasilkan. Penelitian dilakukan dari kurun waktu tahun 2015 dan 2016 di wilayah Perumahan Permata Depok, klaster Mirah 1 dan 2. Variabel yang dipilih untuk menjelaskan hasil penelitian meliputi partisipasi masyarakat dan parameter kimia *Biochemical Oxygen Demand* (BOD), *Chemical Oxygen Demand* (COD), *Methylene Blue Active Substances* (MBAS), serta minyak dan lemak. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan partisipasi warga dalam mengelola limbah rumah tangganya, maka kualitas limbah cair yang dihasilkan per rumah meningkat untuk parameter BOD, COD, serta minyak dan lemak. Akan tetapi peningkatan kualitas limbah cair tidak ditemukan untuk parameter MBAS.

Kata Kunci : pengelolaan limbah rumah tangga, partisipasi masyarakat, kualitas limbah cair, permukiman.

ABSTRACT

DOMESTIC WASTE WATER QUALITY AND PARTICIPATION OF ENVIRONMENTAL CARE COMMUNITY AT PERMATA DEPOK HOUSING CLUSTER MIRAH 1 AND 2. Based on density and rapid population growth, domestic waste becomes a serious threat to water environmental quality. Because overcrowding in the city and its peri-urban makes them as domestic waste main producers. On the other hand those areas have potential population who has willingness to participate in managing waste. Thus, community has ability to clean up its waste. This paper presents the correlation between community participation in peri-urban area in managing household waste water with produced waste water quality. The research is conducted in 2015-2016 at Permata Depok housing, cluster Mirah 1 and 2. Variables of this research are community participation and chemical parameters including Biochemical Oxygen Demand (BOD), Chemical Oxygen Demand (COD), Methylene Blue Active Substances (MBAS), and oil and grease. The result showed that community participation in managing household waste water has effect to the concentration of tested parameters. Parameters' concentrations that declined are BOD, COD, and oil and grease, while MBAS is not affected.

Keywords : management of household waste water, community participation, waste water quality, housing.

PENDAHULUAN

Pengelolaan wilayah perkotaan tidak hanya berfokus dengan isu sosial, tetapi juga bertanggung jawab terhadap pembangunan ekonomi dan dampak lingkungan akibat proses pembangunan yang berlangsung (1). Wilayah perkotaan disini mencakup kota dengan daerah belakangnya atau penyangga. Kota Depok sebagai daerah penyangga memiliki karakteristik antara lain sebagai daerah transisi perkotaan Daerah Khusus Ibukota Jakarta dengan pedesaan Kabupaten Bogor. Sifat lainnya adalah masalah khas perkotaan berupa masalah lingkungan, termasuk didalamnya pengolahan limbah dan

sanitasi (2). Untuk itu manajemen lingkungan dibutuhkan agar dapat melindungi lingkungan hidup dan menciptakan kehidupan masyarakat yang layak (1). Dengan sanitasi yang bagus, maka kesehatan masyarakat terlindungi dan degradasi lingkungan dapat dicegah (3).

Limbah domestik yang dihasilkan oleh kegiatan permukiman menjadi salah satu sumber pencemar acak (*non-point source*) yang perlu dikelola. Pengawasan sumber pencemar acak merupakan tantangan pengelolaan lingkungan hidup hingga saat ini (4). Terlebih jika sumber pencemar acak berlokasi di Daerah Aliran Sungai (DAS) dengan saluran sanitasi atau selokan

langsung masuk ke sungai. Oleh karena permukiman berkaitan erat dengan keberadaan masyarakat, maka keterlibatan masyarakat sebagai penghasil terbesar limbah rumah tangga untuk mengelola limbahnya menjadi penting(5).

Masyarakat harus dilibatkan dan berpartisipasi penuh dalam segala aspek pembangunan. Dengan melibatkan masyarakat, diharapkan hasil pembangunan dapat lebih “berkelanjutan”(6).Peran serta masyarakat menjadi hal mutlak dalam menciptakan lingkungan hidup yang sehat(5).Peran serta masyarakat bertujuan supaya hasil perencanaan sesuai dengan kebutuhan masyarakat dan kondisi lingkungan(7). Dengan pelibatan masyarakat, maka pemahaman masyarakat bertambah dan mengetahui yang menjadi kebutuhan wilayahnya(7). Keberadaan pengelolaan limbah berbasis masyarakat dapat menjadi salah satu cara untuk mengurangi persoalan sampah dan limbah(8).

Penelitian yang dilakukan berlokasi di Sektor Mirah, Perumahan Permata Depok, Kelurahan Pondok Jaya, Kecamatan Cipayung, Kota Depok, Provinsi Jawa Barat. Berdasarkan hasil penelitian tahun 2015, lokasi tersebut tidak memiliki sistem pengolahan limbah yang memadai, tetapi limbah rumah tangga masuk kedalam satu selokan terpusat menuju Sungai Ciliwung(5). Penduduk di lokasi penelitian sudah paham tentang lingkungan dan kemauan untuk terlibat serta membayar (*willingness to pay*) ada, walaupun perlu ditingkatkan(5). Kedua temuan ini merupakan informasi dasar untuk melakukan penelitian lanjutan dengan melibatkan partisipasi warga dalam mengelola limbah domestik rumah tangga.

Pertanyaan penelitian yang dirumuskan yaitu “Apakah partisipasi warga dalam mengelola limbah domestik rumah tangga berdampak terhadap kualitas air limbah yang dihasilkan?”.

Tujuan penelitian adalah meningkatkan partisipasi masyarakat dalam mengurangi limbah cair (*gray water*) yang masuk ke Sungai Ciliwung dengan rekayasa sosial. Peningkatan partisipasi masyarakat melalui pembinaan daerah percontohan (*Demonstration Site Station/ DSS*). Manfaat dari penelitian adalah untuk mengetahui dampak partisipasi masyarakat dalam mengelola limbah domestik rumah tangga terhadap kualitas air limbah yang mereka hasilkan dari kegiatan sehari-hari.

Parameter air limbah yang diamati terdiri dari limbah organik rumah tangga (*Biochemical Oxygen Demand (BOD)*, *Chemical*

Oxygen Demand (COD), *Methylene Blue Active Substances (MBAS)*, serta minyak dan lemak (M-L).Pemilihan parameter berdasarkan ketentuan baku mutu air limbah domestik(9)yang dihubungkan dengan kemampuan warga mengelola limbahnya secara sederhana.Pengolahan limbah secara sederhana dipilih karena kemampuan warga kurang dalam mengurus peralatan yang canggih(2). Umumnya untuk negara berkembang, sistem manajemen lingkungan yang ideal adalah berbiaya rendah dan usaha perawatan serta operasionalnya minimal(3).

METODOLOGI

Metodologi yang digunakan dalam pengambilan contoh uji air limbah domestik adalah secara manual dan sesaat (*manual grab methods sampling*) mengacu pada *Science and Ecosystem Support Division Operating Procedure Wastewater Sampling-306-R3*, 2013(10). Analisis kimia meliputi parameter *Biochemical Oxygen Demand (BOD)*, *Chemical Oxygen Demand (COD)*, *Methylene Blue Active Substances (MBAS)*, serta minyak dan lemak (M-L) dilakukan di laboratorium Puslitbang Kualitas dan Lingkungan (P3KLL) yang terletak di Kawasan Puspiptek, Gedung 210, Tangerang Selatan. Parameter dan metode seperti tercantum pada Tabel 1. Acuan metode analisis air limbah rumah tangga berikut:

Tabel 1. Acuan metode analisis air limbah rumah tangga

Parameter	Metode
<i>Biochemical Oxygen Demand, BOD5</i>	JIS K 0102.21-2008
<i>Chemical Oxygen Demand, COD</i>	SNI 6989.2-2009
Minyak dan Lemak	SNI 6989.10-2011
Deterjen, MBAS	SNI 6989.51-2005

Pengolahan data hasil analisis kimia air limbah (parameter MBAS, M-L, BOD dan COD) untuk mengetahui pengaruh sebelum dan setelah perlakuan DSS dilakukan dengan tahapan sebagai berikut:

- Penyusunan data dasar, melakukan tabulasi dan pengecekan terhadap data-data yang berasal dari laboratorium secara ilmiah

- maupun non ilmiah, misalnya verifikasi satuan tiap parameter yang digunakan;
- Data *screening*/ uji normalitas dan uji transformasi, melakukan uji normalitas terhadap populasi data yang diperoleh sehingga memenuhi sebaran data yang telah ditentukan dengan metode statistik dan *software* yang digunakan adalah IBM SPSS versi 23;
 - Uji *outlier*, menguji populasi data terhadap nilai data yang anomali dengan metode statistik IBM SPSS versi 23;
 - Pengolahan data sesuai keperluan, pengolahan data dilakukan setelah populasi data dibersihkan dari data *outlier*, pengolahan data untuk menghitung median untuk menyusun karakteristik limbah rumah tangga di lokasi penelitian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian lingkungan hidup diarahkan untuk memenuhi prinsip keberlanjutan yang meliputi faktor fisik, sosial dan ekonomi. Dengan demikian selain meneliti masalah lingkungan terkait pencemaran atau kerusakan, maka manusia menjadi aspek penting untuk dilibatkan. Masyarakat perlu dilibatkan karena mereka sendiri yang mengetahui yang diinginkan dan dibutuhkan(6). Volume air limbah berkaitan erat dengan standar hidup masyarakat(11). Partisipasi menjadi salah satu teknik penting untuk diimplementasikan dalam perencanaan dan pembangunan perkotaan(12), dalam hal ini adalah pembangunan sistem sanitasi di permukiman. Partisipasi masyarakat bertujuan untuk mengoptimalkan pengelolaan sampah(13) yang dalam penelitian ini sampah diganti dengan air limbah. Keterlibatan masyarakat dapat dipahami sebagai bentuk penerimaan program dan jaminan keberlanjutan hasil program(12).

Di lokasi penelitian yang dipilih tidak ditemukan sistem pengolahan limbah yang memadai(5). Seperti umumnya ditemukan di Indonesia, saluran pembuangan limbah dan saluran drainase disatukan sehingga air limbah yang terkumpul langsung menuju pembuangan terakhir (badan sungai) tanpa diolah. Air limbah yang tidak diolah dan langsung dibuang ke saluran menyebabkan risiko pada kesehatan

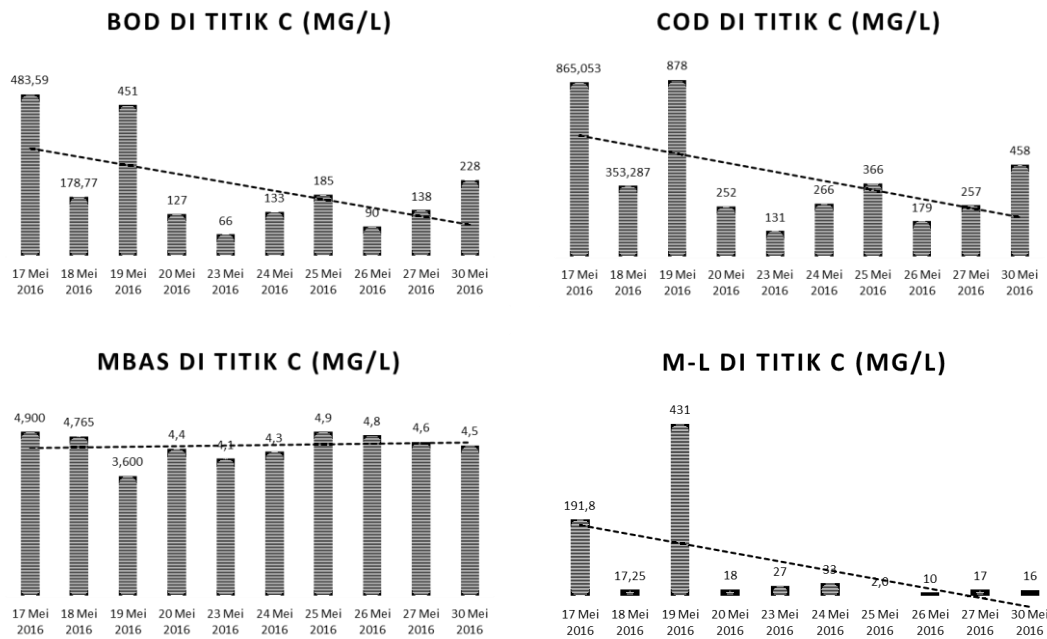
manusia dan lingkungan(14). Dengan kondisi prasarana sanitasi seperti ini, maka masyarakat dapat berperan mengelola limbah di rumah masing-masing sehingga kebutuhan lingkungan yang sehat dapat tercapai.

Untuk wilayah yang kecil seperti lokasi kegiatan penelitian ini, pelibatan masyarakat luas memungkinkan(15). Akan tetapi karena keterbatasan dana, maka contoh uji hanya dapat dilakukan untuk lima titik sebagai percontohan DSS selama 10 kali pengambilan data lapangan. Lima titik ini merupakan rumah warga seperti disampaikan pada Tabel 2. Kode titik sampling.

Tabel 2. Kode titik sampling

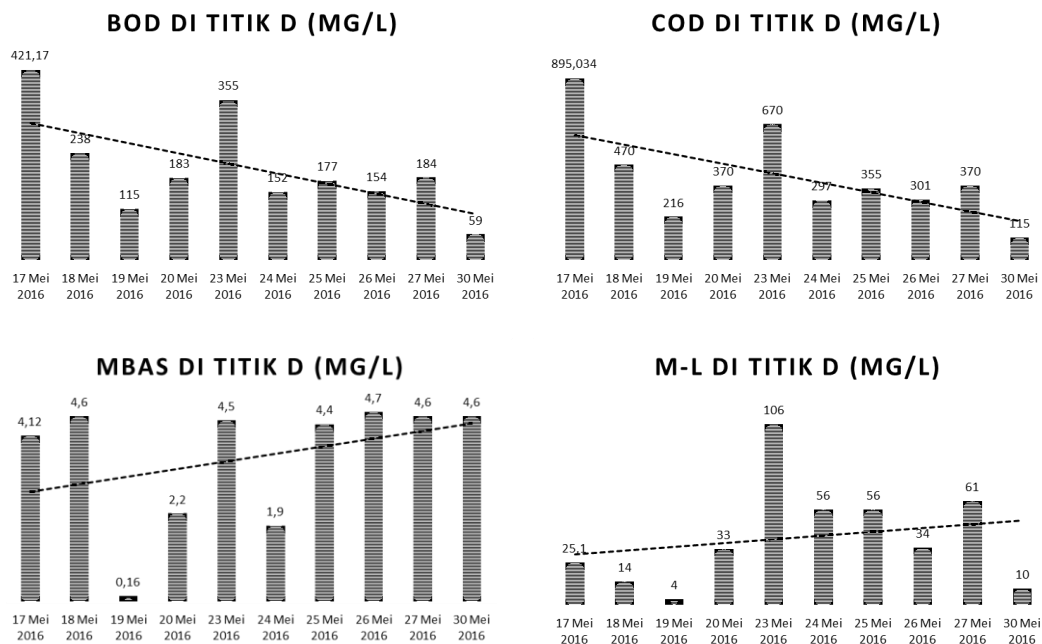
Kode	Lokasi
C	Rumah ibu AM
D	Rumah ibu AR
E	Rumah ibu WI
F	Rumah ibu NI
G	Rumah ibu MA

Selama DSS dilakukan (tanggal 18-30 Mei 2016), penghuni rumah yang diwakili para ibu diminta untuk mempraktikkan pengelolaan sumber pencemarnya berupa pemilahan bahan organik dan minyak. Rekayasa sosial yang dipilih sangat sederhana, yaitu sampah dapur, ampas kopi dan teh, sisa susu, air cucian buah dan sayur, serta minyak jelantah tidak dibuang langsung kedalam saluran bak cuci piring. Sementara, jenis sabun untuk mandi dan mencuci tetap seperti biasa. Hasilnya dapat dilihat pada Gambar 1 sampai dengan Gambar 5 yang menunjukkan perubahan kualitas air limbah domestik rumah tangga untuk parameter BOD, COD, MBAS, dan M-L. Data pada tanggal 17 Mei 2016 adalah rona awal ketika DSS belum dipraktikkan.



Gambar 1. Perubahan kualitas air limbah di titik C

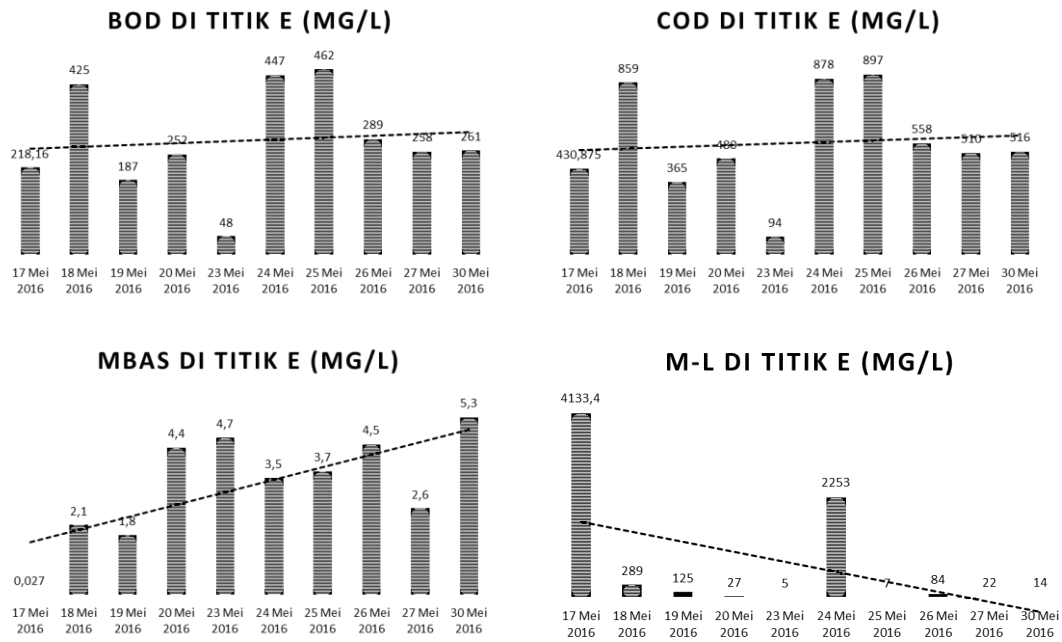
Di titik C, kadar BOD, COD, dan M-L menunjukkan penurunan selama DSS dilakukan. Namun kadar MBAS menunjukkan sedikit peningkatan hingga akhir pengamatan.



Gambar 2. Perubahan kualitas air limbah di titik D

Di titik D, kadar BOD dan COD menunjukkan penurunan selama DSS dilakukan. Namun kadar

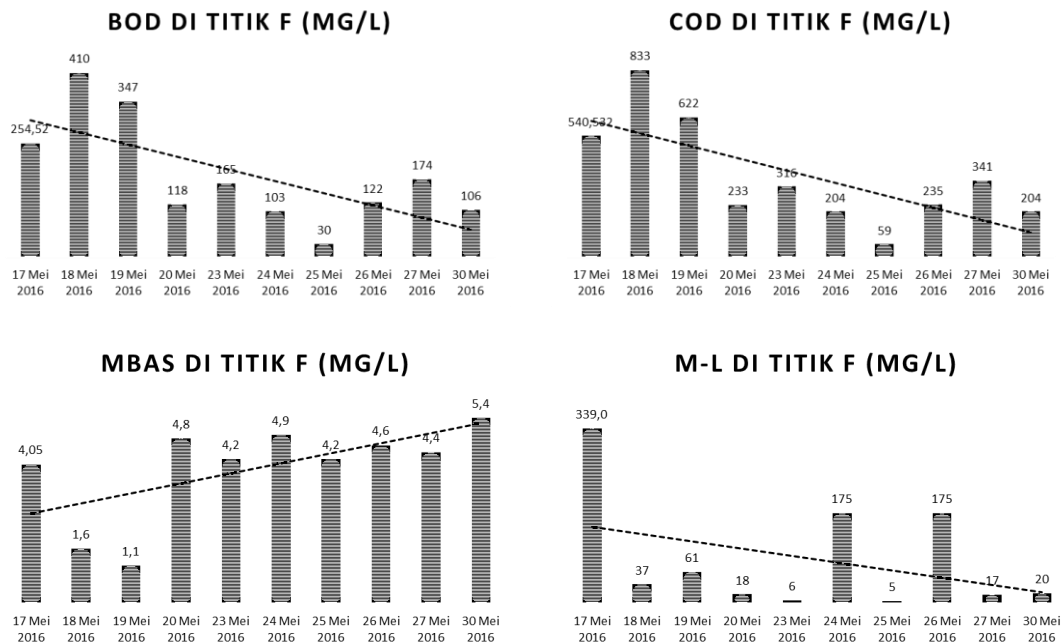
MBAS dan M-L menunjukkan peningkatan hingga akhir pengamatan.



Gambar 3. Perubahan kualitas air limbah di titik E

Di titik E, hanya kadar M-L yang menunjukkan penurunan selama DSS dilakukan. Sementara itu, kadar BOD dan COD menunjukkan sedikit

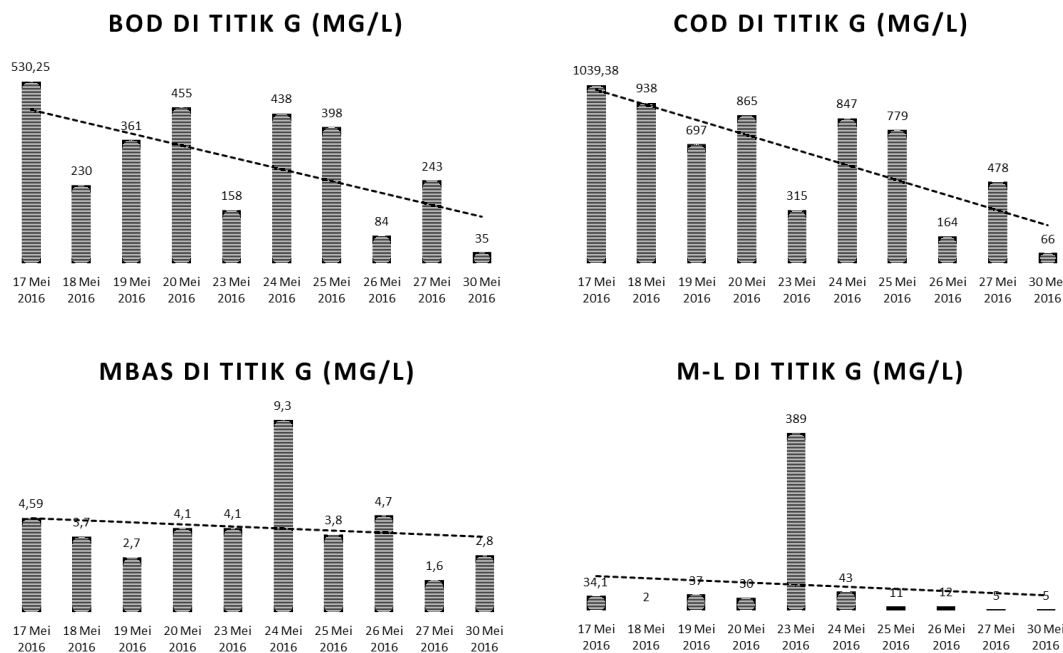
peningkatan serta MBAS yang meningkat cukup signifikan hingga akhir pengamatan.



Gambar 4. Perubahan kualitas air limbah di titik F

Di titik F, kadar BOD, COD, dan M-L menunjukkan penurunan selama DSS dilakukan.

Namun kadar MBAS menunjukkan peningkatan hingga akhir pengamatan.



Gambar 5. Perubahan kualitas air limbah di titik G

Di titik G, seluruh parameter menunjukkan penurunan selama DSS dilakukan. Dengan kadir MBAS dan M-L menunjukkan sedikit penurunan hingga akhir pengamatan.

Dari ke-lima titik pengamatan diperoleh hasil sebagai berikut:

- Parameter BOD konsentrasinya menurun, kecuali di titik E
- Parameter COD konsentrasinya menurun, kecuali di titik E
- Parameter M-L konsentrasinya menurun, kecuali di titik D
- Parameter MBAS konsentrasinya meningkat, kecuali di titik G

Untuk penurunan konsentrasi BOD dan COD disebabkan oleh pemilahan bahan pencemar yang bersifat organik. Untuk penurunan M-L disebabkan oleh penyisihan minyak jelantah. Sementara untuk parameter MBAS yang cenderung meningkat disebabkan karena tidak dilakukan rekayasa sosial dengan mengganti sabun cuci yang tidak mengandung deterjen.

Dari penelitian ini diperoleh hasil bahwa MBAS adalah parameter yang sulit dikelola. Ini menunjukkan bahwa deterjen atau

sabun banyak digunakan masyarakat(16) sehingga merusak ekosistem(17). Penggunaan deterjen yang semakin meningkat seiring dengan membaiknya pendapatan masyarakat akan berdampak pada jumlah limbah yang dihasilkan. Bila proses degradasi tidak berjalan seimbang, maka akan berakibat terakumulasinya surfaktan pada badan-badan perairan dan terhambatnya transfer oksigen(18).

DSS yang dipraktikkan dalam kegiatan penelitian tidak hanya berupa kegiatan pemilahan sumber pencemar di dapur. Akan tetapi dicontohkan juga cara mengolah limbah minyak jelantah dengan hasil akhir berupa sabun organik yang relatif ramah lingkungan. Dengan percontohan tersebut, dua jenis polutan berupa minyak dan lemak, serta MBAS dapat dikendalikan dari tingkat rumah tangga. Tanpa pengolahan air limbah dari sumber pencemar, maka kualitas air limbah yang dihasilkan dari Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) sekalipun tidak menunjukkan penurunan kadar pencemar yang signifikan(14).

KESIMPULAN

Kualitas air limbah domestik dapat diperbaiki melalui rekayasa sosial berupa partisipasi masyarakat dalam mengelola limbah yang dihasilkan. Perbaikan kualitas air limbah

domestik dapat dilihat melalui menurunnya konsentrasi beberapa parameter seperti BOD, COD, sertaminyak dan lemak setelah dilakukan rekayasa sosial, kecuali untuk deterjen (MBAS). Limbah domestik terkait dengan gaya hidup atau kebiasaan melalui hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kebiasaan menggunakan sabun atau deterjen dalam rumah tangga belum bisa dikurangi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Pusat Penelitian dan Pengembangan Kualitas dan Laboratorium Lingkungan (P3KLL), Badan Penelitian, Pengembangan, dan Inovasi (BLI), Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) atas dukungan pendanaan penelitian. Kami juga mengucapkan terima kasih kepada tim penelitian Ciliwung dan para partisipan penelitian sehingga kegiatan ini dapat terlaksana.

DAFTAR PUSTAKA

- van Dijk MP. *Managing Cities in Developing Countries: The Theory and Practise of Urban Management*. North Hampton: Edward Elgar Cheltenham UK; 2006. 4; 72 p.
- Bright-Davies L, Lüthi C, Jachnow A. DEWATS for Urban Nepal: *A Comparative Assessment for Community Wastewater Management*. *Waterlines [Internet]*. 2015;34(2):119–38. Available from: <http://web.b.ebscohost.com/ehost/pdfviewer/pdfviewer?vid=0&sid=eb6ea6b9-9b3b-476b-b71b-e1997aa1dc4d@sessionmgr103>
- Asemota L, Alkhaddar R, Sertyesilisik B, Tunstall A. *Wastewater Management in Lagos State: Moving Toward a More Sustainable Approach*. *Environ Qual Manag [Internet]*. 2011;49(4):16–8. Available from: <http://web.b.ebscohost.com/ehost/pdfviewer/pdfviewer?vid=0&sid=a00de6bc-4542-4c90-b689-c2d76eba8598@sessionmgr102>
- Putra HP, Taufiq AR, Juliani A. Studi Hubungan antara Tingkat Pendidikan dan Pendapatan Keluarga terhadap Sikap dalam Pengelolaan Sampah Rumah Tangga. *J Sains dan Teknol Lingkung [Internet]*. 2013;5(2):91–101. Available from: <http://journal.uui.ac.id/index.php/JSTL/article/view/3502/3095>
- Purwati SU, Aryantie MH. Profil Masyarakat dan Lingkungannya sebagai Modal Membangun Peran Serta Masyarakat dalam Upaya Pencegahan Pencemaran Lingkungan. *Ecolab [Internet]*. 2016;10(2):58–69. Available from: <http://ejournal.fordamof.org/ejournal-litbang/index.php/JKLH/article/view/2801/2042>
- Sosrowinarsito I, Kombaitan B. Pendekatan Partisipatif dalam Perencanaan Kota: Belajar dari Den Haag, Belanda. *J Perenc Wil dan Kota [Internet]*. 1998;9(2):60–70. Available from: <http://journals.itb.ac.id/index.php/jpwk/article/view/4371/2384>
- Wiwaha AA, Mei ETW, Rachmawati R. Perencanaan Partisipatif Jalur Evakuasi dan Titik Kumpul Desa Ngargomulyo dalam Upaya Pengurangan Resiko Bencana Gunungapi Merapi. *J Reg City Plan [Internet]*. 2016;27(1):34–48. Available from: <http://journals.itb.ac.id/index.php/jpwk/article/view/1609/1143>
- Furqan M. *Supporting Indicators for the Successful Solid Waste Management Based on Community at Rawajati*, South Jakarta. *J Wil dan Lingkung [Internet]*. 2013;1(3):245–50. Available from: <http://ejournal2.undip.ac.id/index.php/jwl/article/view/138/pdf#>
- KLHK. Peraturan Menteri LHK No. P.68/Menlhk/Setjen/Kum.1/8/2016 tentang Baku Mutu Air Limbah Domestik [Internet]. Jakarta: DPR RI; 2016. Available from: kalimantan.menlhk.go.id/index.php/public/page/download/1162
- Wastewater Sampling. Athens: U.S. Environmental Protection Agency; 2013. p. 1–24.
- Purwati SU, Aryantie MH, Pitalokasari OD. *Rekayasa Sosial Solusi Tepat Mengurangi Limbah Rumah Tangga*. Beranda: Majalah Ilmiah Populer P3KLL. Tangerang Selatan; 2017;5–7.
- Andini I. Keputusan Siapa? Partisipasi Komunal pada Pelaksanaan Program Sanimas di Kelurahan Kadipiro, Kota Surakarta. *J Perenc Wil dan Kota [Internet]*. 2014;25(2):126–36. Available from: <http://journals.itb.ac.id/index.php/jpwk/article/view/1283/817>
- Maharani SE, Suarna IW, Suyasa IWB. Karakteristik Sampah dan Persepsi Masyarakat terhadap Pengelolaan Sampah di Kecamatan Banyuwangi Kabupaten Banyuwangi Provinsi Jawa Timur. *Ecotrophic J Environ Sci [Internet]*. 2012;2(1):1–8. Available from: <https://ojs.unud.ac.id/index.php/ECOTROPIC/article/view/2470>

14. Massoud MA, Tareen J, Tarhini A, Nasr J, Jurdi M. *Effectiveness of Wastewater Management in Rural Areas of Developing Countries: A Case of Al-Chouf Caza in Lebanon*. Environ Monit Assess [Internet]. 2010;161(1-4):61–9. Available from: <http://web.b.ebscohost.com/ehost/pdfviewer/pdfviewer?vid=0&sid=e8dc5049-e1e5-4cae-99f6-7182e26693a2@sessionmgr104>
15. Tarigan R. *Perencanaan Pembangunan Wilayah*. Revision. Jakarta: P.T. Bumi Aksara; 2008. 19 p.
16. Rahman AA, Lelono GS. *Pemanfaatan Minyak Goreng Bekas Menjadi Detergen Alami Melalui Kombinasi Reaksi Transesterifikasi Trans Esterifikasi dan Sulfonasi*. J Teknol Kim dan Ind [Internet]. 2013;2(2):84–90. Available from: <http://ejournal-s1.undip.ac.id/index.php/jtki>
17. Lala O, Badilo IA, Gintu AR, Hastuti DKAK. *Surfaktan yang Biodegradable dari Minyak Goreng Bekas*. In: *Seminar Nasional Sains dan Pendidikan Sains VII UKSW* [Internet]. Salatiga: Universitas Kristen Duta Wacana; 2012. Available from: http://repository.uksw.edu/bitstream/123456789/3073/2/PROS_Olkelala_Agung_RG_Istari_B_Dewi_KH_Surfaktan_yang_Biodegradable_Full_text.pdf
18. Purwati SU, Aryantie MH, Pitalokasari OD. *Inventarisasi Karakteristik Limbah Domestik di Sungai Ciliwung*. Tangerang Selatan; 2016.

ALTERNATIF PENGOLAHAN LIMBAH INDUSTRI TEMPE DENGAN KOMBINASI METODE FILTRASI DAN FITOREMEDIASI

Silvi Wahyu Puspawati

Sekolah Ilmu Lingkungan Universitas Indonesia

Salemba Raya No. 4, Kampus UI Salemba, Kota Jakarta Pusat, Daerah Khusus Ibukota Jakarta

silviwahyup@gmail.com

ABSTRAK

ALTERNATIF PENGOLAHAN LIMBAH INDUSTRI TEMPE DENGAN KOMBINASI METODE FILTRASI DAN FITOREMEDIASI. Tempe merupakan produk kedelai tradisional yang berasal dari Indonesia. Tempe memiliki peran penting dalam upaya meningkatkan gizi bagi masyarakat. Namun, pada proses pembuatan tempe ini akan menghasilkan limbah dari hasil perebusan, perendaman dan pencucian kedelai. Limbah ini akan memberi dampak negatif terhadap lingkungan dan perairan apabila hasil buangan limbahnya melebihi batas baku mutu kadar limbah yang telah ditetapkan oleh Pemerintah. Oleh karena itu dibutuhkan pengolahan air limbah tempe yang tepat. Pilihan metode pengolahan air limbah tempe tergantung pada sifat fisik, kimia, dan biologi. Metode filtrasi dan fitoremediasi adalah metode yang efektif dan mudah bagi para pelaku industri kecil untuk menolah limbahnya. Makalah ini akan mengulas aplikasi kombinasi metode filtrasi dan fitoremediasi dengan menggunakan tanaman eceng gondok (*Eichhornia crassipes Mart. Solms.*) serta kemampuannya dalam menurunkan kadar *Chemical Oxygen Demand* (COD), *Biochemical Oxygen Demand* (BOD), dan *Total Suspended Solid* (TSS) pada limbah cair tempe.

kata kunci : Air limbah tempe, filtrasi dan fitoremediasi, BOD, COD, TSS

ABSTRACT

*ALTERNATIVE WASTE TREATMENT OF TEMPE INDUSTRIAL WITH COMBINATION METHOD OF FILTRATION AND PHYTOREMEDIATION. Tempe is a traditional soybean product from Indonesia. Tempe has an important role in efforts to improve nutrition for the community. However, in the process of making this tempe will produce waste from the boiling, soaking and washing soybeans. This waste will have a negative impact on the environment and waters If the waste disposal exceeds the waste quality standard determined by the Government. Therefore, proper tempe wastewater treatment is required. Alternative of wastewater treatment methods depends on physical, chemical, and biological characteristics. The method of filtration and phytoremediation is an effective and easy method for small industry actors to treat their waste. This paper will review the application of a combination of filtration and phoriemidiation methods using water hyacinth (*Eichhornia crassipes Mart. Solms.*) And its ability to reduce levels of Chemical Oxygen Demand (COD), Biochemical Oxygen Demand (BOD), and Total Suspended Solid (TSS) at wastewater of tempe.*

Keywords : wastewater tempe, filtration and phytoremediation, BOD, COD, TSS

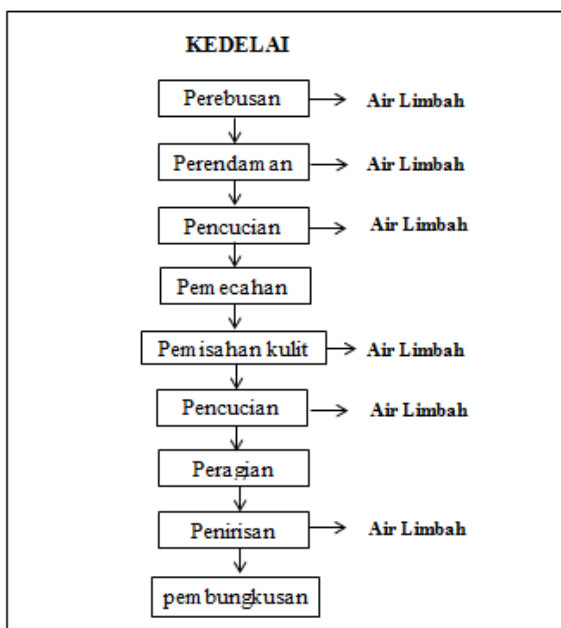
PENDAHULUAN

Tempe adalah produk kedelai tradisional yang berasal dari Indonesia. Tempe adalah makanan berprotein tinggi yang per unitnya lebih murah daripada sumber protein hewani lainnya seperti daging, susu dan telur. Tempe memiliki peran penting dalam upaya meningkatkan gizi bagi masyarakat, terutama untuk kelas menengah ke bawah. [1] Robert O 'Blake, Duta Besar AS untuk Indonesia, mengatakan bahwa 90% kedelai yang digunakan untuk tempe dan tahu bahan baku yang diimpor dari AS, Indonesia merupakan negara dengan pangsa pasar kedelai terbesar. Pada tahun 2013 nilai ekspor agrikultur Amerika ke Indonesia

mencapai US\$ 4,8 miliar. [2] Hal ini membuktikan bahwa tingginya kebutuhan kedelai di Indonesia. Sekitar 50% kedelai digunakan untuk membuat tempe dan 40% untuk membuat tahu. [3] Pada tahun 1988, perkiraan konsumsi kedelai untuk tempe adalah sekitar 764.000 MT yang merupakan konsumsi rata-rata per kapita 6,45 kg dan meningkat rata-rata 10% dalam lima tahun terakhir. [1]

Industri tempe merupakan industri kecil yang mampu menyerap sejumlah besar tenaga kerja baik yang terkait langsung dalam proses produksi maupun yang terkait dengan perdagangan bahan yang merupakan masukan

maupun produk hasil olahannya. Industri tempe memiliki peran yang sangat besar didalam usaha pemerataan kesempatan kerja, kesempatan usaha dan peningkatan pendapatan. Namun, seiring dengan perkembangannya industri tempe memiliki efek negatif pada lingkungan. Industri tempe akan menghasilkan aliran limbah dalam proses pembuatannya. Proses produksi tempe membutuhkan banyak air yang digunakan untuk perendaman, perebusan, pencucian dan pengelupasan kulit kedelai. Limbah yang diperoleh dari proses proses bisa berupa limbah cair atau padat. Dampak limbah padat terhadap lingkungan belum dirasakan, karena bisa dimanfaatkan sebagai makanan ternak, namun limbah cairnya mampu mengeluarkan bau dan saat dibuang langsung ke sungai akan mengakibatkan polusi. 100 kilogram kedelai bisa menghasilkan limbah hingga 2 m³. [4]



Gambar 1. Alur pembuatan tempe. [5]

Berdasarkan Gambar 1. Dapat terlihat bahwa proses produksi tempe menghasilkan limbah cair dalam jumlah yang banyak. Limbah cair yang dihasilkan mengandung padatan tersuspensi dan terlarut yang akan mengalami perubahan fisik, kimia, dan biologi sehingga menghasilkan zat beracun apabila tidak diolah dengan baik serta dapat menciptakan media pertumbuhan bakteri. Bakteri dapat berupa kuman yang menyebabkan penyakit atau jenis

kuman lain yang berpotensi membahayakan manusia atau produktempe itu sendiri. Jika racun tetap berada dalam limbah, maka air limbah akan berubah warna menjadi hitam dan menghasilkan bau. Bau ini bisa menyebabkan penyakit saluran pernafasan, dan jika limbahnya menembus melalui tanah yang dekat dengan sumur air, sudah pasti sumur tidak bisa digunakan kembali. Limbah yang dibuang ke sungai akan mencemari sungai dan jika airnya digunakan, bisa menyebabkan diare dan penyakit lainnya (Nurhasan, 1991). Berikut kadar TSS, BOD, dan COD limbah tempe berdasarkan referensi

Tabel 1. Hasil Analisis Kandungan Limbah Cair Salah Satu Pabrik Tempe di Semarang. [6]

Parameter Limbah	Konsentrasi Baku mutu air limbah (mg/L)	Konsentrasi air limbah (mg/L)
TSS	100	4.012
BOD ₅	150	1.302,03
COD	300	4.188,27

Tabel 1 menunjukkan bahwa konsentrasi air limbah tempe melebihi standar mutu limbah yang disediakan oleh pemerintah. Oleh karena itu, dibutuhkan pengolahan untuk mengurangi tingkat limbah. Konsentrasi TSS dengan konsentrasi tinggi dapat menyebabkan terhalangnya sinar matahari masuk ke perairan. Hal ini akan menyebabkan terhambatnya proses fotosintesis dalam air sehingga kadar oksigennya berkurang di dalam air. Jika oksigen berkurang maka bakteri aerobik akan cepat mati dan bakteri anaerob mulai tumbuh. Hasil aktivitas anaerob inilah yang akan menyebabkan bau busuk tubuh air. Selain itu, angka COD adalah ukuran untuk pencemaran air oleh zat organik yang dapat dioksidasi secara alami melalui proses mikrobiologi dan mengakibatkanberkurangnya oksigen yang terlarut dalam air. TSS, BOD, COD yang tinggi menyebabkan ikan dan organisme lainnya mati.

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk menurunkan COD, BOD, TSS, dan menstabilkan pH seperti Pemanfaatan Koagulan Alternatif Asam Manir (*Tamarindusindica*) dengan efisiensi penyisihan BOD sebesar 82,62%, COD 81,72% dan TSS sebesar 76, 47%. [7] Biofilter struktur sarang lebah dengan sistem kombinasi anaerob-aerob menghasilkan proses

Efisiensi dalam menurunkan nilai BOD sekitar 51 - 91% untuk waktu tinggal satu hari sampai 7 hari. [8] Namun kelemahan metode ini tidak mudah digunakan karena menggunakan bakteri. Metode yang mudah dan sederhana adalah filtrasi [9,10] dan fitoremediasi. [11,12,13] Oleh karena itu, studi ini akan mengulas mengenai kombinasi kedua metode tersebut. Tujuan ulasan mengenai pengolahan limbah cair temped adalah mengusulkan metode pengolahan air limbah yang efektif, mudah dan murah untuk industri kecil. Fokus penelitian yaitu membuat metode yang tepat untuk menurunkan kadar BOD, COD, dan TSS dalam air limbah temped yang telah melampaui batas baku mutu. Metode yang akan dibahas pada studi ini yaitu dengan menggunakan kombinasi metode filtrasi dan fitoremediasi menggunakan tanaman eceng gondok. [14]

TEORI

Metode fitoremediasi dengan Eceng Gondok

Fitoremediasi adalah pengurangan kontaminan berbahaya di lingkungan menjadi konsentrasi yang lebih aman dengan menggunakan tanaman hijau. [15,16,17] Fitoremediasi adalah sistem yang tanaman tertentu yang bekerja sama dengan mikroorganisme di media (tanah, karang dan air) yang dapat mengubah kontaminan (polutan / polutan) menjadi berkurang atau tidak berbahaya. [18] Metode fitoremediasi menurut banyak peneliti merupakan metode yang baru muncul, hemat biaya dan ramah lingkungan untuk rehabilitasi lingkungan yang tercemar. [16,19]

Eceng gondok (*Eichhornia crassipes Mart. Solms.*), merupakan famili dari monocotyledonous *Pontederiaceae*. [20] Selama berabad-abad eceng gondok telah diaplikasikan sebagai tanaman hias oleh manusia karena penampilannya yang menarik. Eceng gondok juga diperkenalkan sebagai *macrophyte* akuatik invasif dan bebas-mengambang oleh banyak ahli botani. [21] Eceng gondok memiliki akar yang panjang yang umumnya tersuspensi dalam air. Struktur akar tanaman air pada khususnya eceng gondok dapat memberikan lingkungan yang sesuai bagi mikroorganisme aerobik agar berfungsi dalam sistem pembuangan

limbah. Mikroorganisme aerobik menggunakan bahan organik dan nutrisi yang ada pada air limbah dan mengubahnya menjadi senyawa anorganik, yang dapat dimanfaatkan oleh tanaman. [21] Eceng gondok telah banyak dipelajari pada skala laboratorium dan skala besar untuk menghilangkan bahan organik yang ada di air pembuangan dibandingkan dengan tanaman air lainnya. [22] Meskipun eceng gondok dikenal sebagai tanaman persisten di seluruh dunia, namun secara luas digunakan sebagai sumber utama pengelolaan limbah dan proses pertanian. [23] Berikut beberapa penelitian yang telah menggunakan metode fitoremediasi :

Metode Filtrasi

Filtrasi adalah sistem pengelolaan limbah yang merupakan proses pemisahan padatan dari cairan menggunakan media berpori untuk menghilangkan padatan tersuspensi dan koloid sebanyak mungkin, dan zat lainnya. Tujuan filtrasi adalah untuk menghilangkan partikel tersuspensi dan koloid melalui penyaringan dengan media filter. [28] Media yang ideal untuk media filter adalah media yang memiliki luas permukaan yang besar per volume bak, murah, dan awet. Secara umum, bahan yang digunakan adalah granit dan potongan batu, karena biayanya murah, dan sebagai tempat mengisi biomassa. [29] Metode filtrasi yang digunakan pada studi ini menggunakan kerikil, ijuk, pasir kuarsa, zeolit, dan arang.

Pasir kuarsa mempunyai fungsi ampuh yaitu untuk menghilangkan sifat fisik seperti kekeruhan atau lumpur atau bau dengan mekanisme menyaring kotoran dan air, pemisah. Ijuk dapat digunakan sebagai agen yang dapat menurunkan kadar kekeruhan yang nantinya memberi efek penurunan pula pada kadar TSS, ijuk dan kerikil berfungsi sebagai media penyaring kotoran-kotoran halus. Arang tempurung kelapa juga mempunyai pengaruh dalam menurunkan kadar TSS pada proses penyaringan, hal ini dikarenakan arang batok kelapa tersebut mempunyai daya serap/adsorpsi yang tinggi terhadap bahan yang berbentuk larutan atau uap. [30] Zeolit dapat melepaskan molekul air dari dalam permukaan rongga yang menyebabkan medan listrik meluas kedalam rongga utama dan efektif terinteraksi dengan molekul yang diadsorpsi, sehingga zeolit dapat menyerap senyawa kimia seperti COD. [31]

Beberapa penelitian yang telah melakukan pengolahan limbah dengan metode filtrasi diantaranya:

Tabel 2. Penelitian dengan menggunakan metode fitoremediasi

Penelitian	Hasil penelitian	Referensi
Tanaman potensial penyerap	Penurunan BOD, COD, dan TSS berturut-turut sebesar 64; 67; 65%	[24]
Pemanfaatan eceng gondok dalam penyisihan logam berat Krom (Cr)	Penurunan kadar Cr sebesar 78,95%	[25]
Pengolahan Limbah Cair Industri Tahu Menggunakan Tanaman <i>Thypha Latifolia</i> Dengan Proses Fitoremediasi	Penurunan BOD 84,76%	[26]
Pemanfaatan Eceng Gondok (<i>Eichhornia Crassipes</i>) Sebagai Tumbuhan Fitoremediasi Dalam Proses Pengolahan Limbah Tambak Udang	Hasil penurunan kadar COD, TSS, dan amonia terlarut adalah 60,39%, 88,5% dan 16,48%	[27]

Tabel 3. Penelitian dengan menggunakan metode filtrasi

Penelitian	Hasil penelitian	Referensi
Meminimalisir Kadar Detergen dengan Penambahan Koagulan dan Filtrasi Media Saring pada Limbah Kamar Mandi	Penurunan COD sebesar 75,43%	[31]
perencanaan bangunan pengelolaan limbah cair tahu	Kadar BOD 237,33 menjadi 175 mg/l; COD 530 menjadi 350 mg/l; TSS 496 menjadi 84,7 mg/l	[32]
Optimasi penurunan COD, BOD dan TSS limbah cair etanol dengan metode Multi Soil Layering (MSL)	Penurunan kadar COD, BOD, dan TSS berturut-turut adalah 80,85; 94,68; 83,99% dengan waktu 2 minggu	[33]
Pembuatan Alat Penyaringan Air Sederhana Dengan Metode Fisika	Semakin besar susunan pasir maka penjernihannya lebih bagus	[34]
Efektivitas filter bahan alami dalam perbaikan kualitas air masyarakat nelayan	Penurunan TSS sebesar 796 mg/l	[30]
pemanfaatan arang aktif limbah kulit kacang kedelai (<i>glycine max</i>) dalam meningkatkan kualitas limbah cair tahu”	Penurunan COD dan BOD sebesar 62,09% dan 23,25%	[35]

METODOLOGI

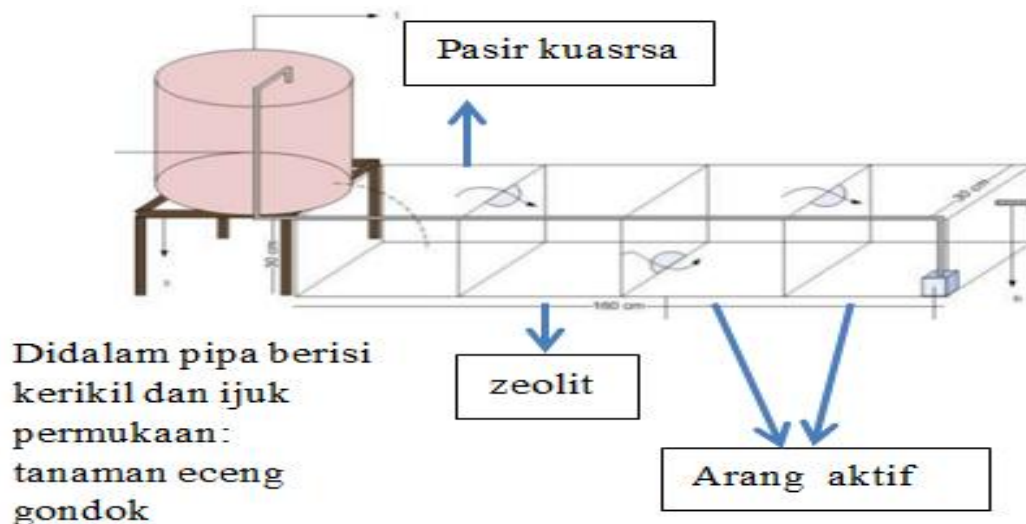
Alat dan Bahan

Peralatan dan bahan yang digunakan antara lain wadah penampung berukuran 200 liter, pipa, ember plastik berukuran sedang sebanyak 4 buah dan pendukung lainnya. Bahan yang digunakan adalah sampel limbah cair tempe, eceng gondok yang telah di aklimatisasi 2 minggu serta media filter berupa kerikil, ijuk, pasir silika, arang tempurung kelapa, zeolit.

Rancangan Reaktor Sederhana

Reaktor dirancang dengan menggunakan bak penampung terbuat dari bahan plastik dengan volume 200 liter. Penggunaan bak tersebut dikarenakan tahan karat, tahan

perubahan suhu dan harganya lebih murah dibanding dengan bahan lainnya. Limbah dari bak penampung dikeluarkan melalui pipa PVC yang disambung pada bagian bawah bak penampung. Lubang untuk aliran ember plastik dibuat dengan aliran upflow (aliran dari atas ke bawah). [36] Pada kotak pertama sampai keempat akan dibuat kombinasi metode filtrasi dan fitoremediasi dengan menggunakan pasir kuarsa (40 cm), zeolit (40 cm) dan arang (40 cm) [37] serta tanaman eceng gondok untuk dipermukaan atasnya. Dengan menggunakan zeolit 40 cm telah menurunkan kadar TSS sebesar 86.64% (90 menit) dan COD 85.53% (120 menit). [38] Berikut desain reaktor sederhana untuk pengolahan limbah cair tempe:



Gambar 2. Desain Sistem Lahan Basah Buatan (*Constructed Wetlands*)
(Novita E & Wahyuningsih S, 2015)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penurunan Kadar BOD, COD, dan TSS

Berdasarkan referensi [14] hasil pengukuran konsentrasi BOD akan menunjukkan perlakuan kombinasi metode filtrasi dan fitoremediasi memiliki pengaruh yang sangat signifikan terhadap penurunan konsentrasi BOD air limbah. Hal ini membuktikan bahwa

kombinasi metode filtrasi dan fitoremediasi dengan menggunakan 1 eceng gondok dapat menurunkan konsentrasi BOD air limbah. BOD dengan hasil terbaik dengan efektifitas penurunan sebesar 59,84% dengan waktu kontak optimum adalah 10 hari. Berdasarkan referensi lainnya menggunakan 2 eceng gondok [12], menunjukkan bahwa persentase penurunan BOD sebesar 84,48% dengan waktu kontak optimum

adalah 6 hari. Hasil penyaringan yang dilanjutkan dengan perlakuan bioremediasi dengan menggunakan tumbuhan Eceng gondok (*Eichornia crassipes*) dengan perlakuan selama 5 hari. Hasil bioremediasi tersebut ternyata menghasilkan penurunan BOD sebesar 98,9 %. [39] Perbedaan ulasan dengan penelitian terdahulu adalah desain reaktornya yang mencoba menggabungkan kedua metode tersebut secara bersamaan dengan dibuat secara sederhana. Berdasarkan referensi tersebut, hipotesis penelitian adalah kombinasi metode ini efektif untuk penurunan kadar BOD.

Berdasarkan referensi [14], hasil penelitian ini menunjukkan bahwa ada pengaruh yang sangat nyata terhadap kombinasi filtrasi dan fitoremediasi untuk menurunkan konsentrasi COD air limbah. Penurunan konsentrasi COD dengan hasil terbaik terjadi pada hari ke 15 dengan penurunan efektifitas 4866,99 mg / L dan efisiensi sebesar 91,32%. Perbedaan dengan penelitian sebelumnya adalah desain rancangan reaktornya sehingga diharapkan akan memiliki waktu pengolahan yang lebih cepat. Jadi hipotesis persentase penurunan COD pada limbah cair tempe akan menunjukkan sekitar 90%.

Berdasarkan referensi [14], Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa ada pengaruh kombinasi filtrasi dan fitoremediasi terhadap penurunan konsentrasi air limbah TSS. Penurunan konsentrasi TSS dengan hasil terbaik terjadi pada hari ke 15 dengan penurunan efektifitas 140,62 mg / L dan efisiensi 60,61%. Berdasarkan referensi lain hasil penurunan kadar TSS menggunakan metode filtrasi sebesar 83,05 sedangkan proses filtrasi yang dilanjutkan dengan metode fitoremediasi menunjukkan penurunan TSS sebesar 97,8%. [39] Hal ini menunjukkan bahwa persentase penurunan dalam penelitian ini diharapkan akan berkisar antara 80-90% sehingga air pengolahan dapat digunakan kembali, seperti untuk mencuci kedelai.

KESIMPULAN

Kombinasi metode filtrasi dan fitoremediasi menggunakan tanaman eceng gondok diharapkan dapat memperbaiki kualitas air limbah tempe dan sesuai dengan standar baku

mutu sehingga air limbah aman untuk dibuang ke lingkungan ataupun digunakan kembali. Dalam pengolahan air limbah tempe, waktu retensi yang diperoleh berbeda antara COD, BOD, dan TSS. Selain itu, jumlah eceng gondok yang digunakan akan mempengaruhi nilai efisiensi pengolahan.

DAFTAR PUSTAKA

1. Shurtleff. W & Aoyagi. A. *History of Tempeh and Tempeh Products*, Soyinfo Center. USA (2011).
2. M.S Permana, 2014., Amerika: Indonesia Importir Kedelai Terbesar. <http://www.bisnis.tempo.com>. Diakses pada tanggal 26 September 2016.
3. Badan Standardisasi Nasional. 2012., Tempe: Persembahan Indonesia untuk Dunia, Jakarta. <http://www.bsn.go.id>. Diakses pada tanggal 26 September 2016.
4. Nurhasan, P. Penanganan air limbah pabrik tahu –tempe, Bintari: Yayasan Bina Karya Lestari.(1991).
5. N.I Said dan A. Herlambang, *Teknologi Pengolahan Limbah Tahu Tempe Dengan Proses Biofilter Anaerob dan Aerob*. Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi. Jakarta(2003).
6. Erry Wiryani, *Analisis Kandungan Limbah Cair Pabrik Tempe*. Lab. Ekologi Dan Biosistemik Jur. Biologi F MIPA. UNDIP Semarang(2007).
7. G. I. Ramadhani and A. Moesriati, *Pemanfaatan Biji Asam Jawa (Tamarindus Indica) sebagai Koagulan Alternatif dalam Proses Menurunkan Kadar COD dan BOD dengan Studi Kasus pada Limbah Cair Industri Tempe*. *Jurnal Teknik ITS*, 2(1), (2013) D22-D26.
8. A.Herlambang, *Pengaruh Pemakaian Biofilter Struktur Sarang Tawon Pada Pengolahan limbah Organik Sitem Kombinasi Anaerob-Aerob* (studi Kasus: Limbah Tahu Dan Tempe). *Jurnal Teknologi Lingkungan*(2011) 2(1).
9. A. Artiyani, *Kemampuan Filtrasi Upflow Pengolahan Filtrasi Up Flow dengan Media Pasir Zeolit dan Arang Aktif Dalam Menurunkan Kadar Fosfat dan Deterjen Air Limbah Domestik*. *Jurnal Industri Inovatif* (2016)6(1).

10. U. B. L. Utami, and R.Nurmasari, *Pengolahan limbah cair sasirangan secara filtasi melalui pemanfaatan arang kayu ulin sebagai adsorben*. Jurnal Sains MIPA Universitas Lampung (2012) 5(3).
11. R. Nurkemalasar, *Fitoremediasi Limbah Cair Tapioka dengan menggunakan Tumbuhan Kangkung Air (Ipomoea aquatica)*. Reka Lingkungan (2013) 1(2).
12. D. F. Sitompul, *Pengolahan Limbah Cair Hotel Aston Braga City Walk dengan Proses Fitoremediasi menggunakan Tumbuhan Eceng Gondok*. Reka Lingkungan (2013) 1(2).
13. R. Wandhana, *Pengolahan Air Limbah Laundry Secara Alami (Fitoremediasi) Dengan Tanaman Kayu Apu (Pistia Stratiotes)*. Jurnal Teknik Lingkungan Universitas Pembanguna Vasten (2013).
14. U. Santos, E. S. Mahreda, F. Shadiq and D.Biyatmoko, *Pengolahan Limbah Cair Sasirangan Melalui Kombinasi Metode Filtrasi dan Fitoremediasi Sistem Lahan Basah Buatan Menggunakan Tumbuhan Air yang Berbeda*. EnviroScientiae 10(3) (2014). 157-170.
15. BE.Pivetz, Ground water issue: phytoremediation of contaminated soil and ground water at hazardous waste sites. United States Environmental Protection Agency(2001). EPA/540/S-01/500.
16. S. Sharma, B. Singh, VK. Manchanda, *Phytoremediation: role of terrestrial plants and aquatic macrophytes in the remediation of radionuclides and heavy metal contaminated soil and water*. Environ Sci Pollut Res 22(2) (2014) 946–962.
17. Emmanuel D, Elsie U, Patience, *A Phytoremediation of xylene polluted environment, using a macrophyte Commelina benghalensis L*. Asian J Plant Sci Res 4(3) (2014) 1–4.
18. Mahendra Dewi, N. L. P., Mahendra, M. S., & Suyasa, I. W, *Pengembangan Fitoremediasi Untuk Meningkatkan Kualitas Air Limbah Hasil Pengolahan Instalasi Pengolahan Air Limbah Suwung*. Ecotrophic: Journal of Environmental Science, 8(1) (2014) 54-61.
19. Sood A, Uniyal PL, Prasanna R, Ahluwalia AS, *Phytoremediation potential of aquatic macrophyte, Azolla*. Ambio (2012) 41:122–137
20. Patel, S., Threats, management and envisaged utilizations of aquatic weed Eichhornia crassipes: an overview. Rev. Environ. Sci. Biotechnol. 11 (2012) 249–259
21. Gopal, B., (1987). Aquatic Plant Studies 1. WaterHyacinth. Elsevier, Oxford, p. 471
22. Costa, R.H.R., Bavaresco, A.S.L., Medri, W., Philippi, L.S., (2000). Tertiary treatment of piggery wastes in water hyacinth ponds. Water Sci. Technol. 4, 211e214.
23. A. Malik, Environmental challenge vis-a-vis opportunity: the case of water hyacinth. Environ Int (2007)33:122–138.
24. Tjokrokusumo, W. 2003. Tanaman Potensial Penyerap Studi Kasus Di Pulau Batam .J. Tek.Ling. P3TL-BPPT.4(2):8-15).
25. Sumiyati. S and Hadiwidodo. M, Pemanfaatan eceng gondok dalam penyisihan logam berat Krom (Cr) pada limbah elektroplating, Teknik – Vol. 28 No. 1 (2007) ISSN 0852-1697.
26. D.A. Disyamto, S. Elystia and I. Andesgur, *Pengolahan Limbah Cair Industri Tahu Menggunakan Tanaman Thypha Latifolia Dengan Proses Fitoremediasi*, JOM FTEKNIK Volume 1 No. 2 (2014).
27. A.I. Alfarokhi, *Pemanfaatan Eceng Gondok (Eichhornia Crassipes) Sebagai Tumbuhan Fitoremediasi Dalam Proses Pengolahan Limbah Tambak Udang Vannamei*, Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta (2016).
28. N. I. Said, *Pengolahan Air Limbah Tangga Skala Individual*. Skripsi. Institut Teknologi Sepuluh November. Surabaya (2005).
29. Eddy and Metcalf. (2003). Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse, Revised by Geo Tchobanoglous. Tata Mc Graw-Hil Publising Company LTD. New Delhi.
30. W. Adi,, S.P. Sari and Umroh, *Efektivitas Filter Bahan Alami dalam Perbaikan Kualitas Air Masyarakat Nelayan Wilayah Pesisir Kabupaten Bangka*, AKUATIK-Jurnal Sumberdaya Perairan Volume 8. Nomor. 2. (2014) ISSN 1978 -1652.Haderiah and N.U.

- Dewi, *Meminimalisir Kadar Detergen dengan Penambahan Koagulan dan Filtrasi Media Saring pada Limbah Kamar Mandi*, HIGIENE VOL 1, NO. 1 (2015) ISSN : 2443—1141.
31. E. Rolia and Y. Amran, *Perencanaan Bangunan Pengolahan Limbah Cair Pada Pabrik Tahu Di Kelurahan Mulyojati 16 c kota Metro*, TAPAK Vol. 5 No. 1 (2015)ISSN 2089-2098
32. Irmanto, Suyata and Zufahair, *Optimasi Penurunan COD, BOD, dan TSS Limbah Cair Industri Etanol (vinasse) PSA Paliman dengan Metode Multi Soil Layering (MSL)*, Jurnal Ilmiah Kimia Molekul (2013) 131-141.
33. R. Gusdi, H. Wita and U. Septiana, *Pembuatan Alat Penyaringan Air Sederhana Dengan Metode Fisika*. Jurnal Nasional Ecopedon JNEP Vol. 4 No.1 (2017) 19–21.
34. N.S. Laras, Yuliani and H. Fitrihidajati, *Pemanfaatan Arang Aktif Limbah Kulit Kacang Kedelai (Glycine max) dalam Meningkatkan Kualitas Limbah Cair Tahu*, LenteraBio Vol. 4 No. 1, (2015) 72–76.
35. E. Novita and S. Wahyuningsih, *Teknologi Penanganan Limbah Cair Untuk Mewujudkan Lingkungan Perkebunan Kopi Rakyat yang Sehat dan Berkelanjutan*. Laporan Akhir Penelitian Strategi Nasional. Universitas Jember.(2015).
36. Rahmah and S.A. Mulasari, *Pengaruh Metode Koagulasi, Sedimentasi dan Variasi Filtrasi terhadap Penurunan Kadar TSS, COD dan Warna pada Limbah Cair Batik*, Chemica Volume 2, Nomor 1, (2015), 7-12.
37. H. Sisyanreswari, W. Oktiawan and A. Rezagama, *Penurunan TSS, COD, DAN Fosfat pada Limbah Laundry Menggunakan Koagulan Tawas dan Media Zeolit*, Jurnal Teknik Lingkungan Vol 3, No 4 (2014).
38. E. Nilasari, M. Faizal and Suheryanto, *Pengolahan Air Limbah Rumah Tangga dengan Menggunakan Proses Gabungan Saringan Bertingkat dan Bioremediasi Eceng Gondok (Eichornia crassipes)*, (Studi Kasus di perumahan Griya Mitra 2, Palembang), Jurnal Penelitian Sains Volume 18 Nomor 1 (2016)18102-8, 18102-1

PENENTUAN POTENSI KEMAMPUAN *TRICHODERMA*, *SP.* Dalam PROSES DEGRADASI SAMPAH PLASTIK RUMAH TANGGA

Aidha Zulaika¹, Tri Edhi Budhi Soesilo¹, Nita Noriko²

¹ Program Studi Ilmu Lingkungan, Fakultas Pascasarjana, Universitas Indonesia

² Program Studi Bioteknologi, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Al-Azhar Indonesia

Alamat email: zulaikakumala1727@gmail.com

ABSTRAK

PENENTUAN POTENSI KEMAMPUAN *Trichoderma*, *sp.* Dalam PROSES DEGRADASI SAMPAH PLASTIK RUMAH TANGGA. Plastik walaupun sangat bermanfaat dalam kehidupan sehari-hari tetapi akan menyebabkan permasalahan lingkungan yang serius jika tidak diolah dengan baik. Sampai saat ini belum ada metode yang efektif untuk digunakan dalam mengurai sampah plastik dan masih dilakukan penelitian-penelitian lebih lanjut untuk mencari metode dan teknologi yang tepat. Tujuan dari penelitian ini adalah mengukur potensi *Trichoderma sp.* dalam mengurai sampah plastik rumah tangga dan menentukan jenis sampah plastik rumah tangga yang dapat diurai oleh *Trichoderma sp.* Metode penelitian adalah eksperimen komposting terhadap 5 kelompok sampah plastik rumah tangga yaitu botol plastik, plastik kemasan, wadah plastik, Bioplastik dan sampah plastik kresek. Sampah plastik tersebut terdiri dari 7 kelompok jenis plastik yaitu: *Polyethylene Terephthalate* (PET), *Polypropylene* (PP), *high-density polyethylene* (HDPE), Bioplastik dan sampah plastik kresek. Dalam proses komposting dilakukan dengan menambahkan fungsi sebagai agen biodegradasi 3 spesies *Trichoderma sp.* yaitu *Trichoderma Harzianum*, *Trichoderma Pseudokoningii*, dan *Trichoderma Hamatum* yang diinkubasi selama 3 bulan. Hasil penelitian walaupun pada eksperimen komposting secara penampakan permukaan tidak terjadi perombakan dan berdasarkan tes *Fourier-transform infrared spectroscopy* (FTIR) tidak terjadi perubahan spektrum resapan gelombang pada plastik PET, akan tetapi berdasarkan bilangan gelombang terjadi perubahan senyawa *alkenes* tidak jenuh menjadi jenuh. Berdasarkan hal tersebut, diambil kesimpulan bahwa diperkirakan telah terjadi proses degradasi awal yaitu dengan perubahan materi senyawa kimia (*deterioration*).

(Kata kunci: Sampah Plastik, Komposting, *Trichoderma sp.*, FTIR)

ABSTRACT

POTENTIAL DETERMINATION of *Trichoderma*, *sp.* in DEGRADATION PROCESS of PLASTIC DOMESTIC WASTE. Plastic although very useful in our daily lives but will cause serious environmental problems if not treated properly, until now there has been no effective method to degrade plastic waste and still doing further research to find the right methods and technologies. The goal of this study is measuring the potential of *Trichoderma sp.* in degrading household plastic waste and determine the type of household plastic waste that can be degraded by *Trichoderma sp.* The methodology is experimental composting to 5 groups of household plastic waste which are bottle plastic, cover plastic, plastic container, bioplastic, and plastic crackle. Household plastic waste consist of 7 types of plastic which are: *Polyethylene Terephthalate* (PET), *Polypropylene* (PP), *high-density polyethylene* (HDPE), *Bioplastic* and *Plastic crackle*. In composting process is done by added fungi as biodegradation agent which are 3 species of *Trichoderma sp.* *Trichoderma harzianum*, *Trichoderma pseudokoningii*, and *Trichoderma hamatum* were incubated for 3 months. The results revealed that even though in composting experiments there is no plastic surface destruction and based on *Fourier-transform infrared spectroscopy* (FTIR) absorption there is no changes on Peak spectrum in PET, but there is changes in wave number spectrum of alkenes from unsaturated to saturated form. Based on this fact, the conclusion of this research is the assumption of phase one in degradation process is happening, marked by change in chemical material compound (*deterioration*).

(Key words: Plastic Waste, Composting, *Trichoderma sp.*, FTIR)

PENDAHULUAN

Salah satu metode pengolahan sampah plastik yang ingin dieksplorasi sesuai dengan prinsip keberlanjutan lingkungan adalah menggunakan organisme biologis untuk mengurai sampah plastik. Hal ini didasari oleh Indonesia sebagai Negara dengan sumber daya hayati terbanyak kedua di dunia setelah Brazil, selain itu Indonesia memiliki potensi yang sangat besar dalam pemanfaatan mikroorganisme, namun demikian pemanfaatan mikroorganisme

masih sangat terbatas terutama dalam sektor lingkungan.

Degradasi plastik yang terbuat dari minyak bumi dalam bentuk polimer, sangat sulit dilakukan. Hal ini dikarenakan plastik terbentuk dari polimer berlapis yang memiliki rantai kimia yang panjang dan banyak senyawa kimia lain yang terkandung dalam plastik untuk mendapatkan sifat-sifat tertentu. Akan tetapi telah dilakukan banyak penelitian untuk mencari mikroorganisme yang memiliki kemampuan mengurai plastik, dan telah ditemukan berbagai mikroorganisme baik bakteri atau jamur yang

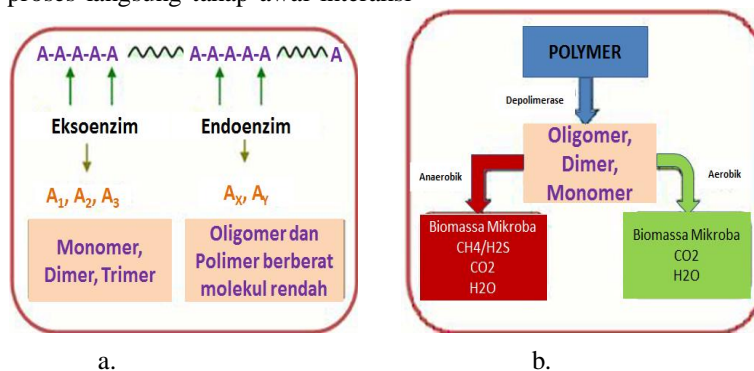
terbukti maupun terindikasi memiliki kemampuan untuk mengurai plastik. Namun sebagian belum diketahui mekanisme dan enzim yang terlibat.

Proses degradasi polimer terdapat faktor-faktor yang mempengaruhi tingkat degradasinya, diantaranya: struktur dan morfologi polimer, berat molekul, karakteristik hidrofobik dan hidrofilik, zat tambahan, metode sintesis, dan kondisi lingkungan. Faktor utama yang mempengaruhi proses degradasi adalah struktur fisika dan kimia polimer, karena dalam proses degradasi polimer tidak hanya dipengaruhi oleh struktur molekul, tetapi juga panjang rantai polimernya dimana semakin pendek rantai semakin mudah untuk didegradasi. Semakin kristal dan semakin rumit formula polimer, maka semakin sulit degradasinya ([9][10]).

Proses biodegradasi polimer dengan mikroorganisme dipengaruhi oleh tumbuhan fungsi mikroorganisme pengurai. Parameter yang perlu diperhatikan adalah kelembaban, temperatur, pH, tingkat salinitas, ketersediaan oksigen, dan suplai nutrisi yang berbeda [11]. Dalam proses biodegradasi, Polimer berpotensi sebagai sumber karbon dan energi untuk mikroorganisme. Interaksi mikroorganisme dan polimer melalui dua proses yang berbeda [9], yaitu: proses langsung dan tidak langsung.

Proses langsung merupakan proses yang terjadi melalui reaksi enzimatik sedangkan proses tidak langsung membutuhkan proses lebih dulu. Pada proses langsung tahap awal interaksi

adalah deteriorasi dimana terjadi reaksi kimia yang dikatalisasi enzim. Enzim yang terlibat adalah eksoenzim dan endoenzim produk dari mikroorganisme. Reaksi pertama adalah pemecahan rantai kimia dengan perombakan substansi pada berat molekul dari residu polimer dalam perpindahan unit terminal monomer, dimer, trimer, oligomer, atau polimer dengan berat molekul rendah. Selanjutnya proses degradasi, enzim depolimerasi ekstraseluler dan intraseluler secara aktif terlibat dalam degradasi biologis polimer proses degradasi dapat terjadi secara aerobik atau anaerobik, tergantung jenis mikroorganismenya. Dalam proses degradasi senyawa kimia hasil depolimerasi yang bermolekul lebih kecil dapat melewati membran semi-permeabel luar bakteri, yang kemudian dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi dan karbon dengan produk akhir inorganik (CO_2 , H_2O , atau CH_4). Proses degradasi secara aerob, mikroorganisme aerob akan menghancurkan material-material kompleks dengan hasil akhir biomassa mikroba, CO_2 , dan H_2O . Sedangkan dalam proses degradasi secara anaerob, mikroorganisme berperan dalam proses deteriorasi polimer dengan hasil akhir biomassa mikroba, CO_2 , H_2O , atau CH_4 . Proses aerobik menghasilkan lebih banyak energi dan mampu mendukung populasi mikroorganismenya yang lebih besar dari pada proses anaerobik [9].

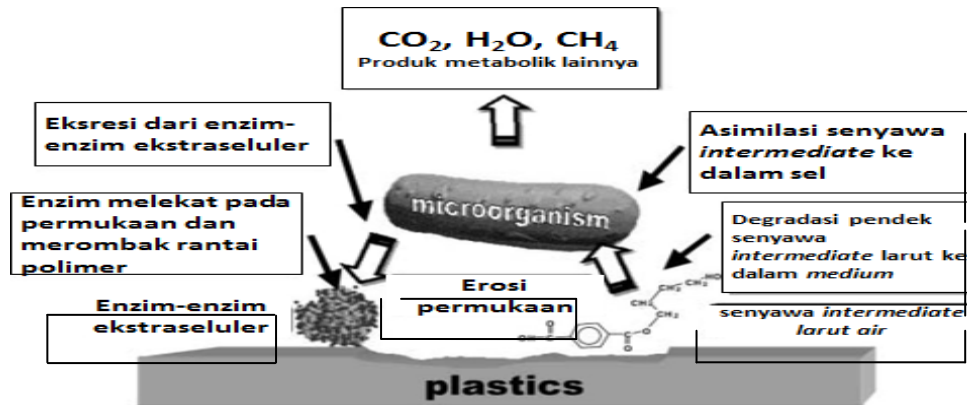


Gambar 1. Interaksi Mikroorganisme dan Polimer dengan proses langsung. a. Deteriorasi. b. Degradasi polimer.

(Sumber: Mohan dan Srivasta, 2010)

Proses biodegradasi plastik biasanya melalui proses heterogenus, karena plastik umumnya material polimer tidak larut dalam air. Karena kurangnya kelarutan terhadap air dan ukuran molekul polimer, mikroorganisme tidak dapat mentransportasikan langsung materi polimer menuju sel dimana proses biokimia terjadi. Sehingga mikroorganisme harus mensekresikan enzim ekstraseluler yang akan mendepolimerasi polimer keluar sel. Jika massa polar polimer

dapat dikurangi sehingga berkarakteristik larut air (*intermediate*), polimer dapat ditransportasikan ke dalam mikroorganisme dan diurai melalui jalur metabolis. Hasil akhir dari proses metabolisme ialah CO_2 , H_2O , dan CH_4 (degradasi anaerob), dan biomassa. Akan tetapi enzim ekstraseluler tidak dapat masuk ke dalam polimer karena berukuran besar sehingga biodegradasi umumnya proses erosi permukaan [11].



Gambar 2. Mekanisme umum Degradasi Plastik Melalui Proses Erosi Permukaan (Sumber: Muller, 2005)

Salah satu mikroorganisme yang berpotensi mengurai plastik adalah *Trichoderma sp.* ([1][2][3]). *Trichoderma* merupakan jamur berkonidiovor, bercabang banyak, phialid tunggal atau bergerombol, dan satu sel. Jamur jenis ini dikenali karena pertumbuhannya yang cepat dan pola kehijauan pada konidiana, bersifat saprofit di tanah atau kayu dan dapat bersifat parasit terhadap jamur lainnya. *Trichoderma* memiliki habitat hidup yang beragam sehingga tersedia di alam secara umum, tumbuh optimum pada suhu 25-30°C (daerah tropis), dan umumnya berada di tanah, karena beragamnya habitat hidup ([14][22]). *Trichoderma* memiliki spesies yang banyak, spesies *Trichoderma* yang telah ditemukan dan

diidentifikasi secara sistematis, tahapan seksual, dan ekologi di seluruh dunia berjumlah 89 spesies [12]. *Trichoderma sp.* selama ini dikenal sebagai pupuk biologis yang memiliki enzim chitinase yang kuat yang digunakan sebagai pertahanan terhadap patogen melalui mekanisme mikoparasitisme [6]. Dalam beberapa tahun terakhir penelitian-penelitian *Trichoderma* dapat digunakan untuk mengurai logam berat, pestisida, gasoline, pengolahan limbah cair maupun limbah padat, dan degradasi plastik dan turunannya. Sampai saat ini penelitian terkait *Trichoderma* mendegradasi plastik masih dilakukan pada Tabel 1 beberapa penelitian terkait *Trichoderma* mendegradasi plastik.

Tabel 1. Penelitian-penelitian *Trichoderma sp.* sebagai pendegradasi berbagai jenis plastik

No	Tipe plastik	Spesies <i>Trichoderma sp.</i>	Metode	Referensi
1	polyurethanes, polyester polyurethanes and polyether polyurethanes	<i>Trichoderma sp.</i>	uji laboratorium dengan mengkulturkan polyurethane dan fungi di cawan petri dengan media agar dan diinkubasi selama 3 minggu pada 30°C dan foam polyurethane sebagai substrat dari strain fungi	[1][13]
2	Plastik dan minyak bumi, Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs)	<i>Trichoderma sp.</i> , <i>Trichoderma virens</i>	uji laboratorium percobaan degradasi dengan tanah terkontaminasi minyak bumi dan gasoline	[2][4][15][17][28]
3	Poly(Ethylene Terephthalate)/PET	<i>Trichoderma spp.</i>	Fusion Proteins	[16]
4	Low Density and High Density Polyethylene / LDPE dan HDPE	<i>Trichoderma harzianum</i>		[18]
5	poly(vinyl alcohol) and poly(acrylic acid)	<i>Trichoderma viride</i>		[19]
6	poly (3-hydroxybutyrate) and wood fibers composites	<i>Trichoderma spp.</i>	The biodegradation ability of the prepared green composites was investigated by estimation of degree of colonization by exposure to <i>Trichoderma spp.</i> action and by Fourier transform infrared spectra scanning. Attack of <i>Trichoderma spp.</i> to PHB composites led to physical and chemical changes.	[20]
7	Straw and Hospital Sewage Sludge.	<i>Trichoderma sp.</i> , <i>Trichoderma aureoviride</i> , <i>Trichoderma koningii</i> , <i>Trichoderma pseudokoningii</i> , <i>Trichoderma reesi</i> , <i>Trichoderma viride</i> and <i>Trichoderma harzianum</i>	Co-composting of Straw and Hospital Sewage Sludge on Total Organic Carbon Degradation	[21][29]
8	Polyurethane (PU) and Low	<i>Trichoderma harzianum</i>	isolates were analysed on Impranil DLN medium as	[23]

	Density Polyethylene (LDPE)		the sole carbon source under both aerobic and anaerobic conditions	
9	Polyhydroxyalkanoates (PHAs) and poly(lactic acid) (PLA) are renewable source-based polymers. Polycaprolactone (PCL), and poly(butylenes succinate) (PBS) are petroleum based	<i>Trichoderma sp.</i> ,	Clear zone on polymer emulsion and biopolymer films	[24]
10	Polyethylene / PE	<i>Trichoderma sp.</i> , <i>Trichoderma viride</i>	soil burial and shake flask biodegradation tests for a period of six months	[25][27]
11	Polyethylene, nylon-6,6 and poly lactic acid	<i>Trichoderma viride</i>	Biodegradation was monitored by following the changes in pH, biomass and weight loss by fermentation technique	[26]

Pemanfaatan *Trichoderma sp.* Diperkirakan ramah lingkungan, ekonomis dan secara sosial dapat diterima. Hal ini dikarenakan *Trichoderma sp.* adalah agen biologis yang tersedia di alam dengan berbagai jenis habitat dan telah dikomersilkan sebagai pupuk biologis, sehingga lebih mudah diterima masyarakat. Secara ekologis ramah lingkungan karena *Trichoderma sp.* (mikroba) melakukan penguraian sampah plastik melalui proses biologisnya ([4][5]). Secara ekonomi juga menguntungkan karena *Trichoderma sp.* telah tersedia di masyarakat sebagai pupuk biologis kemasinan dengan harga terjangkau. Teknologi yang diuji cobakan juga sederhana yaitu teknik komposting, sehingga masyarakat dapat mengolah sampahnya sendiri dan membantu mengurangi volume sampah yang akan dibuang ke TPA.

METODOLOGI

Penelitian ini dilakukan dengan melakukan percobaan komposting sampah plastik dan organik dengan menambahkan inokulasi *Trichoderma sp.* sebagai agen degradasi. Spesies *Trichoderma sp.* yang digunakan adalah *Trichoderma harzianum* (DT38 dan T29), *Trichoderma pseudokoningii* (DT39), *Trichoderma hamatum* (T10). Sampah plastik yang digunakan adalah sampah dengan pembagian sampah plastik kresek, bioplastik, plastik kemasan, botol plastik, dan styrofoam. Kelima kelompok sampah plastik terdiri dari 5 jenis plastik yaitu PP, PET, HDPE, Bioplastik, dan plastik kresek.

Percobaan dilakukan dengan formulasi sampah dan inokulan. Sampah plastik dan sampah organik dipotong-potong menjadi ukuran kecil, sampah plastik dipotong dengan ukuran 5cmx5cm. Larutan inokulan dibuat dengan melarutkan kultur *Trichoderma* dengan air menjadi 2.5L larutan. Sampah kemudian dimasukkan ke dalam komposter buatan yaitu pot tanah liat berukuran 5L dan pada bagian bawah pot terdapat wadah penampung lindi. Sampah dimasukkan secara bertahap pada decomposer

yang telah dilapisi sabuk kelapa untuk menyaring air lindi selama komposting, sampah organik terlebih dahulu kemudian sampah plastik, proses ini dilakukan hingga decomposer terisi $\frac{3}{4}$ bagian. Selanjutnya disiramkan larutan inokulum 250 ml dan diinkubasi selama 3 bulan, dan secara rutin dilakukan pengadukan selama 2 hari sekali dan penambahan sampah organik setiap minggu hingga bulan kedua percobaan.

Analisis data dilakukan untuk mengetahui adanya aktifitas dan tingkatan degradasi sampah plastik rumah tangga oleh *Trichoderma*. Data yang terkumpul merupakan data primer yang mencakup formulasi komposting, penampakan permukaan plastik, tingkat degradasi dengan melihat senyawa kimia dari plastik yang terdegradasi.

Parameter yang dilihat pada penelitian ini adalah mikroba *Trichoderma*, sampah plastik dan air lindi.

Trichoderma di analisis dengan melakukan uji mikrobiologi melalui uji kultur *Trichoderma* pada media PDA dengan metode pengenceran air lindi yang dikumpulkan selama proses komposting, pengenceran dilakukan hingga 10^9 . Hal ini dilakukan untuk mengetahui apakah *Trichoderma* dapat hidup selama proses komposting. Sampah plastik di analisa dengan melakukan pengamatan pada permukaan terhadap kemunculan perombakan di permukaan sampah plastik yang mengindikasikan terjadinya proses degradasi. Uji laboratorium juga dilakukan untuk mengetahui aktifitas degradasi sampah plastik oleh *Trichoderma sp.* dengan melakukan uji FTIR. FTIR sering digunakan untuk melihat perubahan karbon dalam senyawa kimia untuk melihat proses deteriorasi. Hasil FTIR akan terlihat perombakan senyawa kimia dari residu sampah plastik yang tidak terdegradasi maupun yang terdegradasi. Perombakan dilihat dengan melakukan penentuan senyawa kimia dari data FTIR berdasarkan standar literatur, selanjutnya

dibandingkan dengan senyawa kimia sampah plastik sebelum dikomposting. Sampel yang digunakan sekitar 20 ml yang ditempatkan pada botol jam, selanjutnya dilakukan uji laboratorium untuk melihat menentukan aktivitas degradasi secara molekuler.


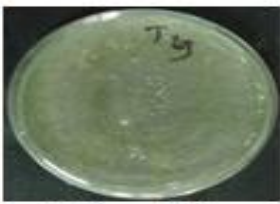


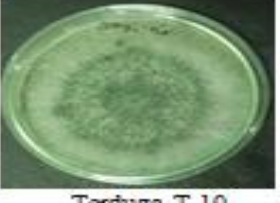



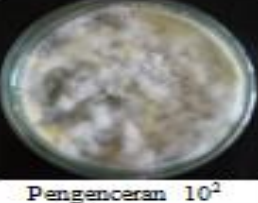



HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah 3 bulan masa pengomposan berdasarkan pengamatan, sampah plastik tidak ada perombakan pada permukaannya. Untuk menentukan adanya aktivitas degradasi dilakukan uji laboratorium pada sampah plastik yang dikompos dengan melakukan uji FTIR dan uji mikrobiologi pada air lindi pengomposan.

Berdasarkan uji mikrobiologi dengan melakukan penampakan mikroskop dengan

perbesaran 1000x, kultur koloni merupakan kultur koloni *Trichoderma* murni dari cawan kultur pengenceran hingga 10^9 , kultur pengenceran yang berasal dari sampel air lindi dimana goresan pada kultur di cawan petri merupakan koloni terduga *Trichoderma*. Berdasarkan kedua uji tersebut didapati penampakan visual *Trichoderma* spesies *harzianum* strain DT 38, *Trichoderma* spesies *pseudokoningii* strain DT 39, *Trichoderma hamatum* strain T10 dan *Trichoderma harzianum* strain T29. Berdasarkan uji tersebut diketahui bahwa populasi *Trichoderma* cukup baik dengan nilai populasi hingga 10^4 (Tabel 2). Dengan demikian dapat dikatakan bahwa *Trichoderma sp.* mampu untuk bertahan hidup dan tumbuh berkembang walaupun dalam kondisi memperebutkan (kompetisi) nutrisi dengan mikroorganisme lainnya.

Tabel 2: Uji Mikrobiologi Kultur Populasi Inokulan *Trichoderma*

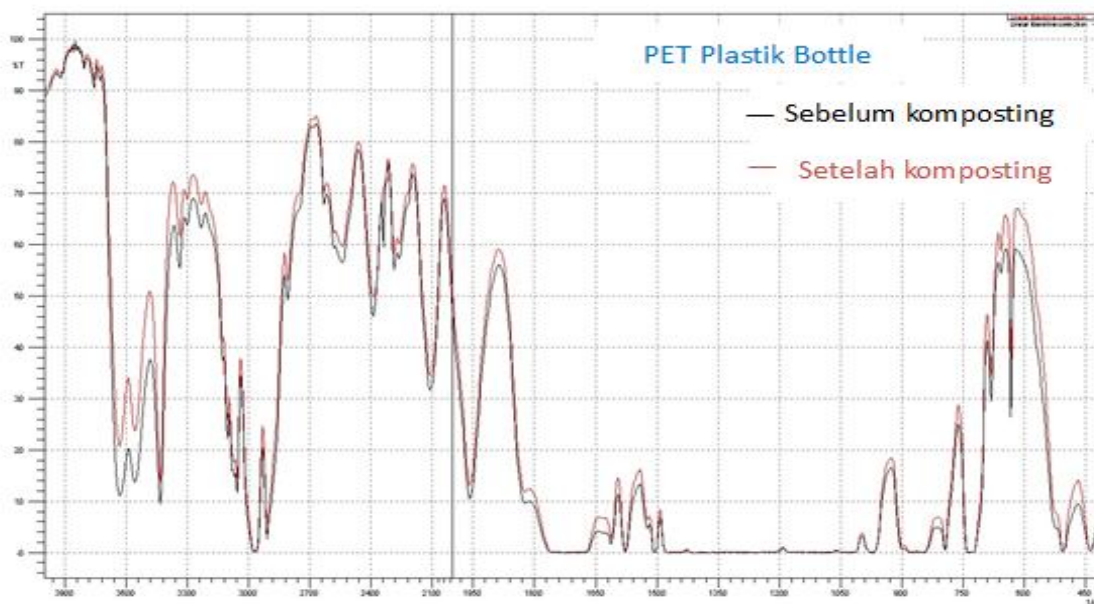
T	Penampakan Mikroskop	Kultur koloni	Pengenceran populasi
T 29	 Perbesaran 1000x	 Terduga T 29	 Pengenceran 10^4
T 10	 Perbesaran 1000x	 Terduga T 10	 Pengenceran 10^3
T 39	 Perbesaran 400x	 Terduga T 39	 Pengenceran 10^2
T 38	 Perbesaran 1000x	 Terduga T 38	 Pengenceran 10^4

Berdasarkan uji laboratorium dengan menggunakan FTIR tidak terjadi perubahan susunan senyawa kimia pembentuk plastik yaitu

PET. (Gambar 3). Akan tetapi Jika dilihat struktur senyawa penyusun kimia pada PET seperti pada uji FTIR dimana dianalisa PET memiliki gugus

fungsi ester pada senyawa penyusunnya yaitu pada serapan spektrum 1900-1700 cm⁻¹, pada perhitungan serapan gelombang antara sebelum dan setelah komposting terdapat beberapa perbedaan baik penurunan atau kenaikan serapan yaitu pada serapan 439,78 cm⁻¹ menjadi 435,93 cm⁻¹, 723,33 cm⁻¹ menjadi 680 cm⁻¹, 974,08 cm⁻¹ menjadi 976,01 cm⁻¹, dan 1820,86 cm⁻¹ menjadi 1937,81 cm⁻¹, hal ini dapat mengindikasikan perombakan walaupun belum tahap perusakan permukaan sampah plastik.

Pada serapan gelombang 723,33 yang tergolong senyawa kimia kelas *Alkynes* dengan struktur kimia C-H mengalami penurunan serapan gelombang menjadi 680,89 walaupun teranalisa tetap golongan kelas *Alkynes* tetapi memiliki rumus kimia yang berbeda yaitu RC=CH (rangkap tak jenuh). Begitu pula pada serapan gelombang 792,77 yang tergolong senyawa kimia kelas *Alkenes* dengan struktur kimia R₂C=CHR mengalami penurunan menjadi 731,05 dengan perubahan golongan kelas senyawa kimia menjadi *Aromatics* (Tabel 3).



Gambar 3: Hasil tes FTIR plastik botol PET sebelum dan setelah komposting.

Tabel 3 Serapan gelombang FTIR sebelum dan setelah composting

Sebelum Komposting				Setelah Komposting			
Bil. Gelombang	% Trans	Gugus	Struktur kimia	Bil. Gelombang	% Trans	Gugus	Struktur kimia
439,78	0,629			435,93	0,327		
505,37	0,409		S-S disulfide	505,37	0,106		
723,33	0,060	Alkynes	C-H	680,89	29,575	Alkynes	RC=CH
792,77	0,730	Alkenes	R ₂ C=CHR	731,05	0,016	Aromatics	
974,08	0,015	alkenes	RCH=CHR	792,77	0,442	Alkynes	R ₂ C=CHR
1504,53	0,028	Aromatics	C-C ring	976,01	0,027		N-O amino oxide
1577,82	0,208	amines	RNH ₂	1506,46	0,023		S-O
1614,47	2,597	Alkenes	5-ring	1577,82	0,063	amines	RNH ₂
1820,86	11,879	Anhydrides	R-CO-O-COR				
1957,81	13,090			1957,81	10,467		
2108,27	34,549	alkynes	C=C	2108,27	31,651		
2283,79	58,214		P-H phosphine				
2386,02	49,711		P-H	2387,95	46,227		

Data ini menyatakan adanya aktivitas kimia yang kemungkinan mengarah kepada proses perombakan senyawa kimia oleh *Trichoderma sp.* dimana berdasarkan reaksi kimia senyawa plastik terdiri dari ikatan tunggal C-H yang menunjukkan bahwa senyawa kimia plastik bersifat jenuh, dengan melalui proses komposting terjadi perubahan menjadi senyawa kimia tak jenuh dengan berikatan rangkap dua RC=CH. Dengan sifatnya yang tak jenuh tersebut karakteristik plastik menjadi rapuh dan mudah lepas atau berikatan dengan senyawa lainnya dan dapat mudah terdegradasi.

Berdasarkan hal ini walaupun pada *peak* resapan gelombang tidak terjadi perubahan *peak* gelombang, tetapi jika dilihat pada angka resapan terjadi perubahan dari senyawa kimia tidak jenuh menjadi jenuh dan senyawa *alkenes* menjadi senyawa aromatik. Oleh karena itu sebenarnya terdapat indikasi perombakan tetapi belum mencapai perusakan permukaan plastik, akan tetapi terjadi proses deteriorasi senyawa kimia.

Berdasarkan penelitian penguraian plastik biofilm yang diuji degradasi menginkubasi potongan biofilm seukuran 2cm x 2cm yang dikulturkan pada cawan petri dengan media racikan yang mengandung senyawa plastik dan senyawa kimia lainnya dengan selama sekitar 30hari terjadi perombakan sebesar 0,6%. Jika dibandingkan dengan percobaan komposting, potongan plastik masih terlalu besar dan lingkungan inkubasi plastik masih kompleks karena masih tersedia nutrisi organik bagi *Trichoderma*, dan skala percobaan yang tergolong *testing out* di lapangan yang sangat berbeda dengan lingkungan di laboratorium.

Terdapat beberapa alasan yang dimungkinkan menjadi penyebab tidak nampaknya proses degradasi yaitu:

1. Spesies atau strain yang digunakan tidak memiliki potensi untuk mendegradasi plastik
2. Metode yang digunakan (komposting) tidak sesuai untuk eksperimen degradasi dengan *Trichoderma* atau plastik.
3. Asal mikroba (dari tanah perkebunan) yang mungkin telah beradaptasi dengan lingkungan asalnya.
4. Masih adanya sumber nutrisi lain (kompos) selain plastik

Pada proses degradasi plastik *Polyethylene* melalui enzim mikroba, terjadi melalui dua tahapan. Pada tahap awal enzim akan menempel pada substrat *polyethylene* kemudian mengkatalis pemecahan hidrolitik, kemudian intraseluler dan

ekstraseluler enzim memecah polimer oleh fungi dan bakteri akan mendegradasi *polyethylene*, dimana karbon dari polimer akan diakumulasi oleh bakteri yang selanjutnya akan dihidrolisis melalui degradasi intraseluler. Kumpulan karbon tersebut berupa rantai monomer, dimer, dan oligomer sehingga dapat melewati membrane bakteri menjadi nutrisi sumber karbon (depolimerasi). Akan tetapi ketika tidak dibutuhkan karbon tersebut setelah diakumulasi akan di hidrolisis melalui degradasi ekstraseluler. Selanjutnya terjadi proses mineralisasi yaitu proses degradasi dengan hasil akhir berupa karbondioksida (CO₂), air (H₂O), dan metan (CH₄), akibat pengaruh temperatur, tekanan, dan kelembaban (faktor fisik) yang secara mekanik memecah polimer karena induksi dari enzim atau senyawa metabolisme yang dihasilkan mikroba. (4)

Enzim atau senyawa metabolisme mikroorganisme juga masing-masing memiliki kemampuan, reaksi, dan kondisi lingkungan yang berbeda-beda untuk bereaksi. Seperti *laccase* yang membantu oksidasi hidrokarbon *polyethylene*, *laccase* umumnya berada di jamur yang mendegradasi lignin dimana dalam prosesnya jamur akan mendegradasi senyawa aromatik.

Lignin, peroksidase *manganese-dependent*, dan *laccase* adalah tiga enzim utama dalam sistem lignolitik. Enzim *papain* dan *urease* dapat mendegradasi plastik medik *polyurethane*, dimana enzim *papain* yang mendegradasi polimer dihasilkan dari hidrolisis senyawa *urethane* dan ikatan urea penghasil gugus *amine* bebas dan kelompok hidroksil. Enzim ini juga dapat membantu mendegradasi *polyethylene* dengan berat molekul yang tinggi dalam kondisi karbon dan nitrogen yang terbatas, pada jamur endofit (*Pestalotiopsis microspore*) didapati enzim serin hidrolase yang memanfaatkan substrat *polyurethane* sebagai sumber karbon dengan mendegradasinya (4).

Sedangkan dalam proses degradasi *polyurethane* (plastik yang telah diketahui didegradasi *Trichoderma*) pada beberapa penelitian ditemukan bahwa yang berperan dalam perombakan adalah enzim esterase dengan memecah molekul ester dan memecah molekul sederhana seperti diethylene Glycol dengan bantuan aktivitas bakteri. Pada beberapa strain enzim esterase memiliki dua jenis enzim yaitu enzim esterase ekstraseluler yang mudah larut dan enzim esterase yang berikatan dengan membrane, enzim yang berikatan dengan membrane inilah yang paling sering ditemukan pada degradasi *Polyurethane*.

Berdasarkan beberapa jurnal (Tabel 1) *Trichoderma* spesies *harzianum* merupakan spesies *Trichoderma* dengan jangkauan kemampuan baik antagonis maupun pendegradasi senyawa logam, berat, beracun, limbah, maupun plastik, minyak bumi, dan hidrokarbon, akan tetapi jika dikaitkan strain maka tidak dapat dipastikan secara pasti, karena dalam publikasi jurnal pembahasan *Trichoderma* sebagian besarnya terbatas pada tingkat spesies, dan didukung dengan sudah terbuktinya berdasarkan beberapa penelitian bahwa masing-masing mikroba memiliki kemampuan yang berbeda-beda walaupun dari satu spesies ataupun bahkan dari satu strain yang sama (6).

Selain itu *Trichoderma sp.* terkenal memiliki senyawa metabolisme yang kuat seperti Chitinase, selulase, Xylanase, lignoselulase, dan beberapa enzim lainnya yang masing-masing memiliki jenis enzim yang berbeda-beda yang memiliki peranan dalam kemampuan *Trichoderma* seperti *Trichoderma harzianum* terkenal memiliki enzim chitinase dan selulase yang sangat kuat umumnya enzim ini berperan dalam kemampuan *Trichoderma* sebagai biofungisida untuk mikroba patogen lainnya.

Pada degradasi plastik reaksi enzimatik yang terjadi adalah reaksi hidrolisis dengan pemicu dari enzim mikroba. Pada degradasi PET oleh *Trichoderma* terdapat protein Hydrophobins yaitu protein yang dapat digunakan pada hidrolisis dari *polyester aliphatic-aromatic* seperti PET dengan berikatan pada permukaan hidrofobik menstimulasi aktivitas enzim cutinase dan memulai proses hidrolisis (7).

Kemungkinan perkiraan penyebab selanjutnya adalah metode yang digunakan (metode komposting), perkiraan ini dipatahkan oleh beberapa penelitian salah satunya penelitian dari Urooj Zafar dimana dilakukan penelitian untuk degradasi plastik *polyurethane* dengan metode mengkomposkan plastik tersebut dengan limbah perkebunan, dimana terbukti *polyurethane* dapat terdegradasi dalam kondisi pengomposan (8).

Perkiraan lainnya adalah asal *Trichoderma* koleksi BPBPI adalah karena isolat merupakan mikroorganisme yang di isolasi dari tanah perkebunan sehingga dimungkinkan bahwa *Trichoderma* tersebut telah beradaptasi dengan lingkungan (sumber makanan) dimana terdapat sumber nutrisi organik yang banyak. Sedangkan beberapa penelitian tentang *Trichoderma* mendegradasi plastik atau senyawa semisalnya dikatakan bahwa *Trichoderma* atau mikroba yang mereka gunakan sebagian besarnya adalah yang

diambil dari lokasi TPA sampah dari sampah plastik yang membusuk dan dari tanah atau kawasan tercemar minyak (mikroba *indigenus*). Akan tetapi dibuktikan oleh penelitian de morais dan tauk-tornisielo, *Trichoderma* yang digunakan adalah yang berasal dari tanah perkebunan yaitu *Trichoderma pseudokoningii* dan beberapa fungi lainnya dimana hasilnya *Trichoderma* tersebut dapat mendegradasi plastik dari perhitungan residu minyak petroleum, didapati 70-60% pengurangan komponen aromatik dan 30% pengurangan dari senyawa resin [30].

Perkiraan lambatnya proses degradasi kemungkinan bahwa masih terdapat sumber karbon (nutrisi) yang dapat dimanfaatkan yaitu sampah organik yang telah menjadi kompos dikarenakan mikroba akan lebih memilih makanan yang mudah dicerna (bahan organik), walaupun telah menjadi kompos, masih dimungkinkan karena *Trichoderma* dialam umumnya tumbuh pada batang atau dahan tumbuhan yang telah lapuk (membusuk).

Penelitian ini juga dirancang sehingga pada bulan ketiga komposting sengaja tidak ditambahkan sampah organik untuk menciptakan keadaan ekstrim (tanpa nutrisi) sehingga *Trichoderma* pada akhirnya akan memakan karbon dari plastik seperti pada salah satu penelitian dimana kultur *Trichoderma* dibiakkan dalam medium plastik juga terdapat potongan plastik pada cawan petri (tidak ada nutrisi organik) dan terbukti terjadi degradasi dengan tingkat degradasi 0,6%. Selain itu pada penelitian Urooj Zafar pada tahun yang menggunakan metode komposting dengan limbah organik juga terbukti *Trichoderma* tetap dapat mengurai plastik walaupun ada sumber nutrisi organik lain dalam bentuk kompos tersebut (8). Dengan demikian dugaan *Trichoderma* tidak dapat mengurai karena masih tersedianya sumber nutrisi lain selain plastik, tidak dapat dibuktikan.

Berdasarkan analisa tersebut, maka disimpulkan bahwa *Trichoderma* memiliki indikasi dapat mengurai plastik dengan adanya perubahan senyawa kimia plastik dari ikatan jenuh menjadi ikatan tidak jenuh, walaupun secara uji FTIR tidak terjadi perubahan *peak* hal ini mungkin dikarenakan perombakan belum mencapai tahap perusakan permukaan plastik tetapi baru tahap pemecahan ikatan senyawa kimia (deteriorasi).

KESIMPULAN

- 1) *Trichoderma spesies harzianum* strain DT 38 dan T 29, spesies *pseudokoningii* strain

DT 39, dan spesies *hamatum* strain T 10 terindikasi mampu mendegradasi sampah plastik.

- 2) Jenis plastik PET yang diuji cobakan dimungkinkan dapat didegradasi oleh *Trichoderma*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Dr. dr. Budhi Soesilo, M.Si dan Dr. Nita Noriko selaku dosen pembimbing, Para dosen Universitas Indonesia dan Universitas Al- azhar Indonesia, Pihak Balai Penelitian Bioteknologi Perkebunan Indonesia (BPBPI), laboratorium farmasi dan fitokimia Universitas Indonesia, dan laboratorium mikroba BPBPI.

DAFTAR PUSTAKA

1. Darby, R.T dan Kaplan, A.M., *Fungal susceptibility of Polyurethane*. *Appl. Microbiol.* 1968, 16 (6):900, (1968).
2. Uzoamaka, G.O., Tasie, F., dan Muotoe-Okafor, F.. *Hydrocarbon degradation potentials of indigenous fungal isolates from petroleum contaminated soils*. *Journal of Physical and natural sciences*. Vol 3. Issue1. 2009,(2009).
3. Loreda-Trevino, García, G., Velasco-Téllez, A., Rodríguez-Herrera1, R., Aguilar, C.N.. *Polyurethane foam as substrate for fungal strains*. *Advances in biosciences and biotechnology*, 2011. 2. 52-58, (2011).
4. Bharwaj, Gupta R., dan Tiwari A.(2012). *Microbial population Assosiated with Plastik Degradation*. *Open Access Scientific Report* Vol 1 issue 5.
5. Howard, G.T.. *Polyurethane Biodegradation*. *International Biodeterioration & Biodegradation* 49 (2002) 245 – 252. S. N. Singh (ed.), *Microbial Degradation of Xenobiotics, Environmental Science and Engineering*, DOI: 10.1007/978-3-642-23789-8_14. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012, (2012).
6. Zulaika, A., Taniwiryono, D, dan Hidayat, Y.S.. *Penetapan beberapa isolat Trichoderma sebagai mikroba endofit*. Jakarta. University al-azhar Indonesia, (2012).
7. Rammer, L-E *et al..Two novel class II hydrophobins from Trichodermastimulate enzymatic*

hydrolysis of poly(ethylene terephthalate) when expressed as a fusion protein. *Journal American Society of Microbiology, Applied and Enviromental Microbiology*, doi:10.1128/AEM.01132-13, (2013).

8. Urooj, Zafar.. *Biodegradation of polyurethane under composting conditions*. (Thesis), Manchester, UK: The University of Manchester:2013, (2013).
9. de Morais, E.B.dan Tauk-Tornisielo, S.M. 2009. *Biodegradation of oil refinery residues using mixed-culture of microorganisms isolated from a landfarming*. *Braz. arch. biol. technol.* vol.52 no.6 Curitiba Nov./Dec. (2009).

Tanya Jawab

Penanya : Sri Unon Purwati

Pertanyaan :

1. Kira-kira potensi *Trichoderma* Sp secara ekonomi bila dipakai aplikasi dilapangan seperti apa ? Agar hasil penelitian tidak terhenti sebagai hasil penelitian karena isu pencemaran plastik terhadap perairan atau sumber air di Indonesia sudah menjadi bahan diskusi.
2. Kemampuan *Trichoderma* Sp dalam merubah bilangan gelombang senyawa alkemer tidak jenuh menjadi jenuh dalam sampel plastik seberapa efektif ?

Jawaban :

1. pada penelitian saya potensi ekonomi yang saya lakukan hanya perhitungan ekonomi sederhana dengan hasil akhir kompos, hal ini dikarenakan ide awal penelitian saya untuk melakukan pengolahan sederhana masyarakat terhadap sampah plastik RT.
2. masih belum dapat dikatakan efektif, karena perubahan baru sampai perombakan ikatan karbon, sedangkan perombakan permukaan plastik belum terjadi. hal ini dimungkinkan butuh waktu lebih lama, spesies *trichoderma* yang memiliki kemampuan rendah atau metode yang kurang efektif. penelitian terkait *trichoderma* mengurai sampahplastik sudah lumayan banyak , akan tetapi berdasarkan referensi yang saya baca sebagian besar penelitian berupa uji lab, selain itu beberapa melakukan perlakuan awal pada sampah plastik untuk melunakkan polimer atau senyawa tambahan plastik

seperti pewarna dll. tetapi ada juga penelitian yang mengambil inokulan tricho dari TPAS maka dari itu saya ingin menguji cobakan tricho pada komposting sampah seperti starter komposting mikroba umumnya. Jadi penelitian saya ini masih penelitian awal yang saya masih ingin dan akan kembangkan selanjutnya.

PENGARUH TEGANGAN LISTRIK, JARAK ANTAR ELEKTRODA DAN WAKTU KONTAK TERHADAP PENURUNAN ZAT WARNA *REMAZOL RED RB* MENGGUNAKAN METODE ELEKTROKOAGULASI

Novie Putri Setianingrum, Agus Prasetya, Sarto

Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada

Jl. Grafika No. 2, Yogyakarta, 55281

beeputri17@gmail.com

ABSTRAK

Batik merupakan salah satu ciri budaya khas bangsa Indonesia yang telah mendapatkan pengakuan dari UNESCO. Industri batik mengalami pertumbuhan cukup pesat. Aktivitas produksi dalam industri semakin meningkat menyebabkan limbah cair terutama dari proses pewarnaan semakin banyak. Metode konvensional untuk pengolahan limbah cair masih memiliki kekurangan sehingga memerlukan metode pengolahan limbah alternatif, yaitu metode elektrokoagulasi. Proses elektrokoagulasi merupakan suatu proses koagulasi dengan menggunakan arus listrik searah melalui proses elektrokimia. Proses elektrokoagulasi dilakukan dengan memvariasikan tegangan listrik sebesar 10 volt dan 15 volt, jarak antar elektroda yaitu 2 cm dan 3 cm dan waktu kontak yaitu 0, 10 menit, 20 menit, 40 menit dan 60 menit. Untuk mengetahui pengaruh tegangan listrik, jarak antar elektroda dan waktu kontak maka dilakukan pengukuran COD, TSS dan Warna dimana sampel diambil setiap 10 menit, 20 menit, 40 menit dan 60 menit lalu dianalisis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tegangan listrik dan jarak antar elektroda memberikan pengaruh terhadap penurunan COD, TSS dan Warna pada limbah cair sintetis *Remazol Red RB*. Jarak antar elektroda dan tegangan listrik yang optimum pada penelitian ini yaitu 2 cm dan 10 volt dengan waktu kontak 10 menit hasil penurunan konsentrasi COD yang pada awalnya 428 mg/L menjadi 54 mg/L, penurunan TSS yang pada awalnya 850 mg/L menjadi 277 mg/L dan penurunan Warna yang pada awalnya sebesar 2733 PtCo menjadi 75,5 PtCo.

Kata Kunci : elektrokoagulasi, aluminium, jarak antar elektroda, tegangan listrik, limbah cair sintetis

ABSTRACT

Batik is one of the distinctive cultural characteristic of the Indonesian national that has gained recognition from UNESCO. Batik industry have grown rapidly. The higher activity in industrial production causes of sewage, especially on batik's dyeing process. The conventional method which is used for processing wastewater still has flow so that need other method of wastewater treatment as an alternative, that is electrocoagulation. Electrocoagulation represent a process of coagulation using unidirectional electricals current through electro-chemical process. Electrocoagulation process is done by varying the range between electrode and electrical voltage. Variation of distance between electrode range of 2cm and 3 cm. Variation of electrical voltage range of 10 volt and 15 volt. To determine the effect of range electrode and electrical voltage to the reduction of COD, TSS and Color sewage than the samples taken 10 minutes, 20 minutes, 40 minutes and 60 minutes during the process were analyzed. The research result showed that the range of the electrode and the voltage are give effect to reduction in COD, TSS and Color in synthetic dyes remazol red rb wastewater. The optimum electrode range, contact time and voltage are 2 cm, 10 volt and 10 minutes. The decrease in COD concentration originally 428 mg/L to 54 mg/L, the decrease in TSS concentration originally 850 mg/L to 277 mg/L and the decrease in Color originally 2733 PtCo to 75,5 PtCo.

Keywords : electrocoagulation, aluminum, distance between electrode, electrical voltage, wastewater

PENDAHULUAN

Istilah batik digunakan untuk menyebut kain bermotif yang dibuat dengan menggunakan material lilin (malam). Batik salah satu ciri budaya khas bangsa Indonesia yang telah mendapatkan pengakuan dari UNESCO serta ditetapkan sebagai Warisan Kemanusiaan untuk Budaya Lisan dan Non-bendawi (*Masterpiece of the Oral and Intangible Heritage of Human*) sejak 2 Oktober 2009. Batik selain menjadi produk budaya dan identitas bangsa, juga dapat menjadi bagian dari kegiatan ekonomi sehingga diharapkan mampu meningkatkan kesejahteraan masyarakat. Industri batik mengalami pertumbuhan yang pesat sehingga mempengaruhi

pertumbuhan perekonomian nasional. Data Kementerian Perindustrian (2015) industri batik dalam negeri telah naik daun yang ditandai meningkatnya produksi batik setiap tahun. Pada tahun 2010 produksi industri batik menembus angka Rp 732,67 miliar atau naik 13% dari periode sebelumnya sebesar Rp 648,94 miliar. Peningkatan jumlah unit usaha batik selama tahun 2011-2015 tumbuh 14,7% dari 41.623 unit menjadi 47.755 unit. Terjadi juga peningkatan tenaga kerja selama 2011-2015 tumbuh 14,7% dari 173.829 orang menjadi 199.444 orang. Peminat batik dari mancanegara meningkat ini tercermin dari nilai ekspor batik yang naik 14,7% dari tahun 2011 senilai Rp 43,96 triliun menjadi Rp 50,44 triliun pada tahun 2015.

Dalam proses produksi industri batik banyak menggunakan bahan kimia dan air. Bahan kimia biasanya digunakan pada proses pencelupan atau pewarnaan. Pada umumnya polutan yang terkandung pada limbah batik berupa logam berat, padatan tersuspensi, atau zat organik. Oleh karena itu, apabila buangan limbah batik dibuang secara langsung ke lingkungan tanpa adanya pengolahan maka dapat menurunkan kualitas lingkungan. Saptarini (2009) telah melakukan pengujian kandungan buangan limbah cair industri batik Indah Yogyakarta dengan melakukan pengujian parameter BOD, COD, TSS dan pH. Sampel limbah pewarna yang digunakan adalah zat warna remazol. Hasil pengujian buangan limbah cair batik Indah Yogyakarta menunjukkan nilai TSS sebesar 720 mg/L, TDS sebesar 14.030 mg/L, BOD sebesar 142 mg/L, COD sebesar 269 mg/L, kekeruhan sebesar 17 NTU, Warna sebesar 324 Pt-Co dan pH sebesar 10,2.

Metode elektrokoagulasi merupakan suatu proses koagulasi kontinyu dengan menggunakan arus listrik searah melalui proses elektrokimia. Dalam proses ini akan terjadi proses reaksi reduksi oksidasi yaitu limbah yang mengandung logam-logam akan direduksi dan diendapkan di kutub negatif (Al) sedangkan elektroda positif (Al) akan teroksidasi menjadi $[Al(OH)_3]$. Teknologi ini pernah diterapkan di instalasi pengolahan air bersih yang cukup besar di London pada akhir abad 19 (Matteson dkk, 1995 dalam Holtdkk, 2004).

Phalakornkule dkk (2010) melakukan penelitian tentang pengolahan limbah tekstil asli dan buatan untuk menghilangkan warna dengan menggunakan metode elektrokoagulasi. Penelitian dilakukan dengan menggunakan sistem batch dengan menggunakan elektroda besi dan aluminium sebanyak 5 pasang. Penelitian ini menunjukkan dengan menggunakan elektroda aluminium dengan prosentase penghilangan warna pada limbah tekstil sebesar 96% - 99%, dengan jarak antar elektroda sebesar 8 mm dan kuat arus 30 A dilakukan selama 5 menit.

Yulianto dkk. (2009) telah melakukan penelitian pengolahan limbah batik menggunakan metode elektrokoagulasi dengan mengamati perubahan konsentrasi COD, warna, TSS dan Minyak Lemak, dan diperoleh hasil penyisihan COD sebesar 30%, Warna sebesar 64%, TSS sebesar 77% dan Minyak Lemak sebesar 88 % dengan menggunakan tegangan

sebesar 25 volt, jarak elektroda 1,5 cm dalam waktu 60 menit.

Pada penelitian ini akan diusulkan pengolahan limbah cair batik sintetis yang mengandung warna remazol ($-SO_2-CH_2-CH_2-O-SO_3H$) menggunakan metode elektrokoagulasi dengan melakukan variasi terhadap jarak antar elektroda, tegangan listrik dan waktu kontak sehingga mendapatkan hasil yang optimal untuk melakukan pengolahan limbah zat warna khususnya warna *remazol red rb*.

METODOLOGI

2.1 Bahan Penelitian

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain: zat warna remazol red rb, *aquadest*, H_2SO_4 (Merck), $K_2Cr_2O_7$ (Merck), batu didih, FAS, Indikator feroin, Ag_2SO_4 (Merck), Hg_2SO_4 (Merck).

2.2 Alat Penelitian

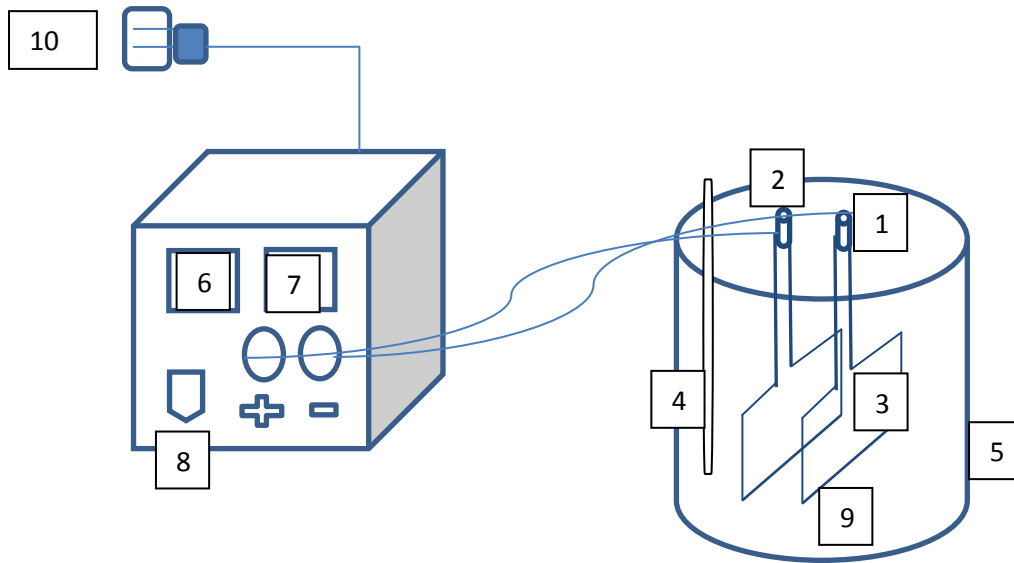
Alat yang digunakan dalam penelitian berupa gelas beaker 500 mL dengan bantuan static head dan plat aluminium dengan ukuran 6 cm x 8cm x 0,1 cm. Gelas beaker tersebut disambungkan ke sumber arus listrik berupa adaptor. Rangkaian alat disajikan pada Gambar 1.

2.3 Prosedur Penelitian

Penelitian ini dilakukan pertama kali dengan cara melakukan pemeriksaan alat elektrokoagulasi, persiapan alat dan bahan penelitian, kemudian melakukan persiapan sampel induk dengan membuat larutan *Remazol Red Rb* konsentrasi 100 ppm. Kemudian sampel dilakukan percobaan dengan melakukan variasi tegangan sebesar 10 volt dan 15 volt dengan jarak antar elektroda sebesar 2 dan 3 cm serta waktu percobaan selama 0, 10, 20 40 dan 60 menit. Kemudian sampel diambil untuk dianalisis konsentrasi COD, TSS dan Warna. Setelah analisis di dapat baru dilakukan perhitungan.

2.4 Analisis hasil

Sampel air limbah dari reaktor untuk dilakukan analisis konsentrasi COD dengan menggunakan analisis COD dengan reflus tertutup, konsentrasi TSS dengan menggunakan metode gravimetri dan Warna dengan menggunakan metode spektrofotometri UV-Vis.



Gambar 1. Rangkaian Alat Penelitian

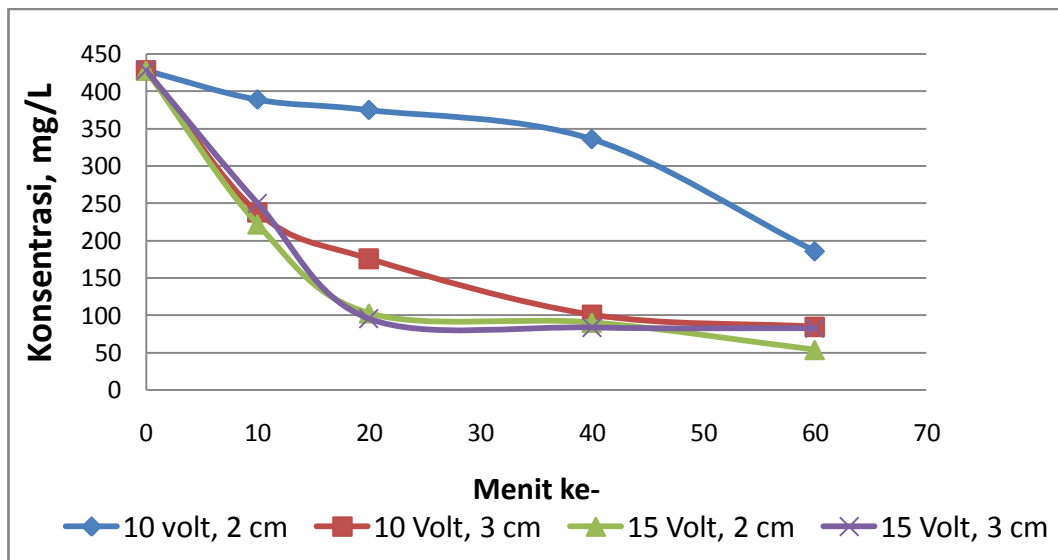
Keterangan:

1. Kabel arus positif
2. Kabel arus negatif
3. Plat aluminium
4. Termometer
5. Gelas beaker 2L
6. Voltmeter
7. Amperemeter
8. Tombol on/off
9. Limbah zat warna
10. Sumber arus listrik

HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pengaruh Tegangan Listrik dan Jarak Elektroda Pada Konsentrasi COD

COD merupakan salah satu parameter penting pada air limbah. COD adalah jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk mengoksidasi bahan-bahan organik yang terdapat dalam air secara kimia. Oleh karena itu penurunan konsentrasi COD dalam penelitian ini sangat berpengaruh. Hasil penurunan COD dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Penurunan Konsentrasi COD

Pada Gambar 2 memperlihatkan bahwa konsentrasi COD menurun dari waktu ke waktu. Pada tegangan 10 volt dengan jarak antar elektroda 2 cm terlihat penurunan konsentrasi COD dari menit ke-0 sebesar 428 mg/L menjadi 186 mg/L pada menit ke-60. Pada tegangan 10 volt jarak elektroda 3 cm terlihat penurunan konsentrasi COD dari menit ke-0 sebesar 428 mg/L menjadi 85 mg/L pada menit ke 60. Pada tegangan 15 volt jarak elektroda 2 cm terlihat penurunan konsentrasi COD dari menit ke-0 sebesar 428 mg/L menjadi 54 mg/L pada menit ke 60. Pada tegangan 15 volt jarak elektroda 3 cm terlihat penurunan konsentrasi COD dari menit ke-0 sebesar 428 mg/L menjadi 82,4 mg/L pada menit ke 60.

Penurunan konsentrasi COD ini disebabkan adanya reaksi oksidasi dan reduksi yang berlangsung pada anoda dan katoda, menghasilkan reaksi sebagai berikut :

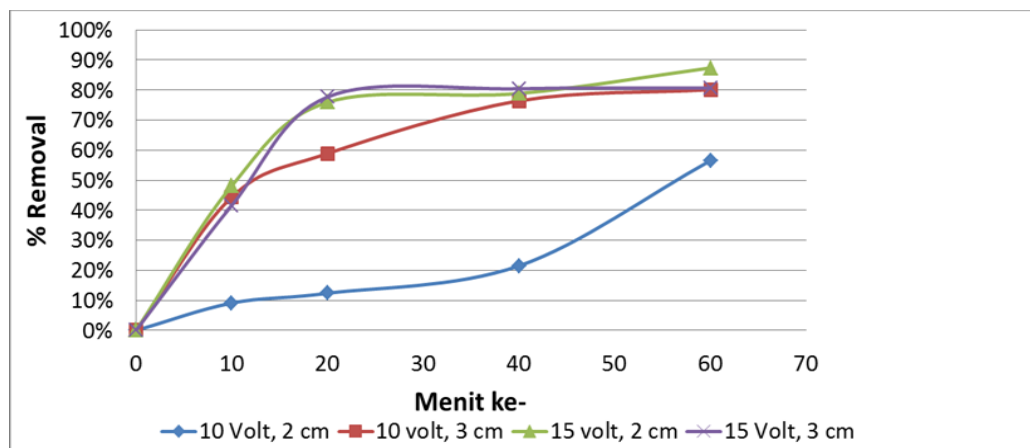
- Pada Anoda :

$$\text{Al}_{(s)} \longrightarrow \text{Al}^{3+}_{(aq)} + 3e^- \quad (1)$$

$$\text{Al}^{3+}_{(aq)} + 3\text{OH}^{-}_{(aq)} \longrightarrow \text{Al}(\text{OH})_{3(s)} \quad (2)$$
- Pada Katoda :

$$3\text{H}_2\text{O}_{(l)} + 3e^- \longrightarrow 3/2 \text{H}_2(g) + 3\text{OH}^- \quad (3)$$

Ion Al^{3+} yang dilepaskan pada anoda dapat bereaksi dengan ion OH^- dan koloid-koloid yang bermuatan negatif membentuk $\text{Al}(\text{OH})_3$ dan membentuk flok-flok dengan partikel-partikel koloid dari limbah. Flok-flok ini perlahan-lahan akan mengendap di dasar gelas beaker. Sedangkan reaksi reduksi yang terjadi pada katoda menghasilkan gas hidrogen (H_2) yang akan membawa koloid-koloid zat pengotor akan naik ke permukaan gelas beaker (proses flotasi). Ini ditandai dengan adanya gelembung/buih yang banyak. Semakin lama proses elektrokoagulasi berlangsung maka akan semakin banyak koloid-koloid yang terikat membentuk flok-flok berukuran besar. Akibat banyaknya flok-flok yang terbentuk terjadi proses penurunan konsentrasi COD.



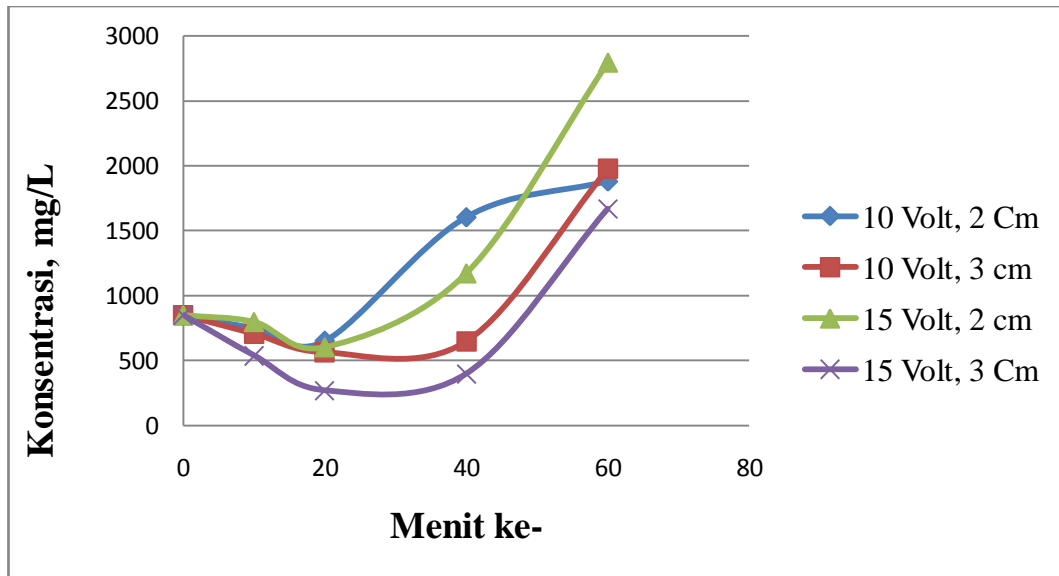
Gambar 3. % removal konsentrasi COD

Dari Gambar 3 memperlihatkan peningkatan persen removal zat warna remazol red rb, dimana persen removal penurunan konsentrasi COD mencapai 87% pada menit ke 60 dengan menggunakan tegangan listrik 15 volt dan jarak antar elektroda sebesar 2 cm. Terbentuknya ion Al^{3+} selama proses elektrokoagulasi berlangsung akan berfungsi sebagai koagulan. Sesuai dengan yang dikemukakan oleh *Michael Faraday*, bahwa semakin lama waktu elektrolisis hasil dari suatu reaksi kimia yang dikehendaki juga akan semakin bertambah. Sehingga semakin lama waktu elektrolisis semakin banyak polutan yang

teroksidasi, hal ini diperlihatkan pada gambar 3 adanya peningkatan % removal COD pada limbah warna *remazol red rb*.

3.2 Pengaruh Tegangan Listrik dan Jarak Elektroda Pada Konsentrasi TSS

Total Suspended Solid (TSS) adalah jumlah bahan tersuspensi dalam suatu volume tertentu. TSS sendiri mencerminkan jumlah kepekatan padatan dalam sampel air. Nilai TSS dalam penelitian ini mengalami hasil yang turun kemudian naik kembali, ini dapat dilihat pada gambar 3.



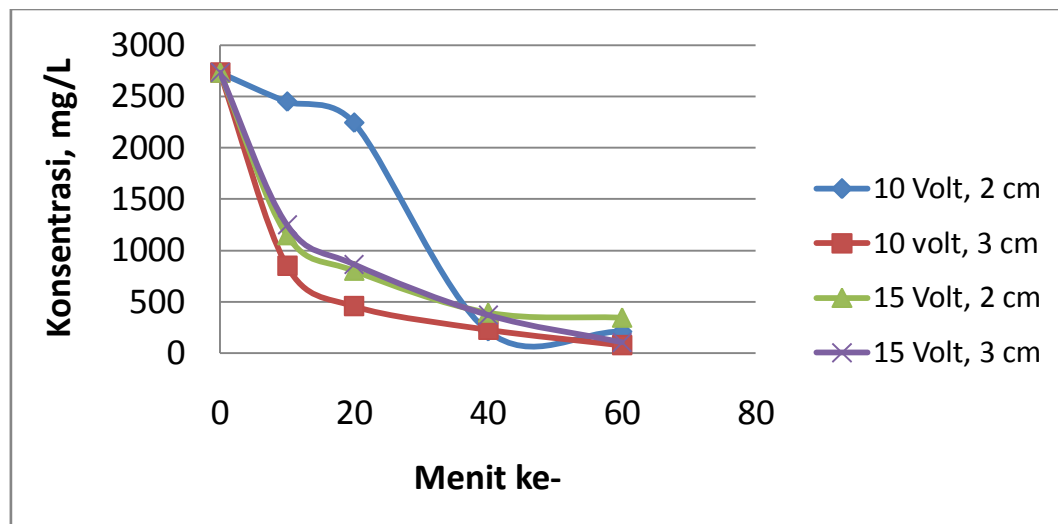
Gambar.4 Penurunan dan kenaikan konsentrasi TSS

Penurunan konsentrasi TSS juga dipengaruhi oleh tegangan listrik dan waktu kontak, dimana semakin besar tegangan listrik dan semakin lama waktu kontak yang digunakan mengakibatkan penurunan konsentrasi TSS semakin besar. Turunnya konsentrasi TSS disebabkan pada anoda terjadi reaksi oksidasi anion (ion negatif). Anoda yang terbuat dari logam akan mengalami reaksi oksidasi yang membentuk $Al(OH)_3$. Sedangkan reaksi reduksi yang terjadi pada katoda menghasilkan gas hidrogen (H_2) yang akan membawa koloid-koloid zat pengotor akan naik ke permukaan gelas beaker (proses flotasi). Prinsip proses kerja penurunan konsentrasi TSS secara umum sama seperti proses kerja penurunan kadar COD, dimana adanya pertambahan massa flok sehingga berat jenis flok menjadi lebih besar dan akhirnya mengendap pada dasar reaktor.

Berdasarkan Gambar 4 terlihat adanya kenaikan nilai konsentrasi TSS seiring dengan bertambahnya waktu proses dan tegangan yang diberikan. Hal ini berhubungan dengan besarnya kuat arus dan tegangan listrik yang diberikan pada saat proses elektrokoagulasi berlangsung. Semakin besar tegangan listrik yang diberikan semakin banyak pula dihasilkan flok-flok yang berfungsi untuk mengikat kontaminan yang berada pada air limbah. Flok-flok yang dihasilkan sebagian dapat mengendap dan sebagian terflotasi ke permukaan.

3.3 Pengaruh Tegangan Listrik dan Jarak Elektroda Pada Warna

Warna merupakan senyawa yang dapat digunakan dalam bentuk larutan sehingga penampangnya berwarna. Dalam industri batik, warna yang digunakan adalah warna sintetis seperti naphtol, indigosol dan remazol.



Gambar.5. Penurunan Warna

Pada Gambar 5 terlihat penurunan warna seiring dengan bertambahnya waktu proses elektrokoagulasi. Penurunan warna disebabkan adanya proses adsorpsi. Proses adsorpsi berfungsi untuk menyisihkan senyawa-senyawa aromatik dan senyawa terlarut. Semakin besar tegangan listrik, menyebabkan larutnya anoda semakin tinggi sehingga jumlah kompleks *hydroxo cationic* akan naik dan menyebabkan zat warna yang ada akan membentuk gumpalan yang lebih besar. Dengan terbentuknya flok yang lebih besar mengakibatkan jumlah sludge yang dihasilkan akan banyak, sehingga zat warna yang dihilangkan semakin banyak. Polutan yang merupakan zat warna akan membentuk ligands yang mengikat pada $Al(OH)_3$ dengan reaksi berikut (Dalvand dkk, 2011) :



Dengan terikatnya zat warna pada proses elektrokoagulasi, maka konsentrasi COD yang terdapat pada air limbah akan mengalami penurunan. Penghilangan warna, TSS dan COD memiliki pola yang sama, semakin kecil jarak elektroda maka penghilangan warna, TSS dan COD semakin tinggi, karena reaksi ionisasi antar elektroda akan semakin cepat sehingga penurunan COD, TSS dan warna lebih cepat terjadi.

3.4 Pelarutan Plat Aluminium

Berdasarkan teori $E^0_{Al} < E^0_{H_2O} < E^0_{O_2}$ sehingga aluminium cenderung mengalami oksidasi sedangkan spesi lainnya lebih cenderung mengalami reduksi. Oksidasi aluminium menyebabkan terjadinya peluruhan yang menghasilkan ion Al^{3+} yang berfungsi sebagai agent koagulan. Percobaan elektrokoagulasi ini menggunakan dua plat elektroda jenis aluminium, yang dipotong dengan ukuran yang sama yaitu 6 cm x 10 cm x 0,1 cm. Kedua plat tersebut dimasukkan ke dalam sampel air limbah cair pewarna *Remazol Red Rb* dan dialirkan arus listrik selama proses elektrokoagulasi dilakukan dengan voltase tertentu. Penggunaan aluminium didasarkan atas beberapa penelitian yang telah ada dimana dinyatakan bahwa reaktor yang menggunakan aluminium pada kedua elektroda yaitu anoda dan katoda dilaporkan proses pelarutan aluminium melebihi 100% (Przegorlinski dkk, 1978; Donini dkk, 1994; Mameri dkk, 1998; Bozin dan Mikhailov, 1990 dalam Holt, 2002).

Berdasarkan Hukum Faraday akan terjadi dekomposisi massa aluminium berbanding lurus dengan tegangan dan waktu. Secara teoritis pelepasan ion aluminium selama elektrokoagulasi dihitung dengan menggunakan *Hukum Faraday*.



(a) (b) (c)

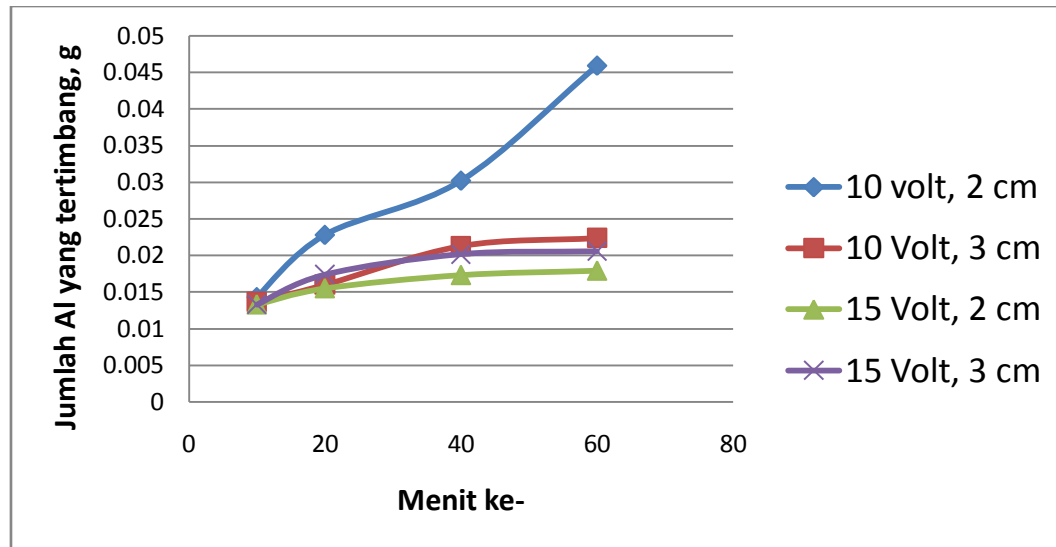
Gambar 6. Kondisi permukaan elektroda selama proses elektrokoagulasi
(a) Sebelum digunakan (b) pertama kali pemakaian (c) pemakaian berulang kali

Tabel.1. Hasil Pelarutan Plat Aluminium Pada Anoda

No	Faktor Pengukur			Elektroda Awal (gram)	Elektroda Akhir (gram)	Jumlah Al yang tertimbang (gram)
	Voltase (Volt)	Jarak Elektroda (cm)	Waktu Kontak (Menit)			
1	10	2	0	4,5241	0	0
			10	4,5241	4,5098	0,01430
			20	4,5108	4,4870	0,02280
			40	4,4945	4,4568	0,03020
			60	4,4765	4,4109	0,04590
		3	0	4,5241	0	0
			10	4,5241	4,5105	0,01365
			20	4,5098	4,4945	0,01600
			40	4,4934	4,4732	0,02130
			60	4,4745	4,4508	0,02240
2	15	2	0	4,5241	0	0
			10	4,5241	4,5108	0,0133
			20	4,5107	4,4953	0,0174
			40	4,4958	4,4780	0,0202
			60	4,4773	4,4601	0,0206
		3	0	4,5241	0	0
			10	4,5241	4,5108	0,0133
			20	4,51097	4,4934	0,0174
			40	4,4942	4,4732	0,0202
			60	4,4703	4,4526	0,0206

Dari Gambar 7 dan Tabel 1 dapat terlihat pelarutan aluminium yang meningkat dari menit ke -0 sampai menit ke- 60. Jumlah Al yang terlarut paling tinggi pada tegangan 10 volt

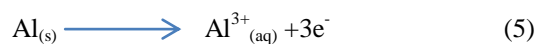
dengan jarak antar elektroda sebesar 2 cm pada menit ke 60 dengan jumlah pelarutan mencapai 0,4590 gram.



Gambar.7. Jumlah Aluminium yang tertimbang

Pelarutan aluminium terjadi pada elektroda baik anoda. Pada proses pelarutan aluminium ini terjadi reaksi kimia yang berbeda pada permukaan kedua elektroda. Pada bagian katoda terjadi penyerapan permukaan elektroda atau yang biasa disebut absorpsi sedangkan pada anoda terjadi penurunan ion positif.

Anoda melepaskan ion-ion positif sehingga ion-ion positif ini akan terus berkurang saat dialiri arus listrik, reaksi dari proses ini sebagai berikut :



Sedangkan pada katoda akan menghasilkan lapisan baru di atas permukaan plat. Ini terjadi karena adanya absorpsi dari interaksi antara ion-ion yang ada pada air limbah berwarna remazol red. Lapisan baru ini akan mengubah permukaan plat elektroda secara signifikan dan meningkatkan daya potensial listrik untuk mengalirkan arus listrik sebelum percobaan berlangsung.

Menurut Phalakornkule, dkk (2010) menyatakan besarnya massa yang terdekomposisi bergantung pada kuat arus dan waktu kontak yang digunakan. Tegangan yang digunakan berbanding lurus dengan arus listrik yang mengalir. Semakin tinggi tegangan listrik yang digunakan dan semakin lama waktu kontak yang diberikan maka semakin banyak Al^{3+} yang terurai sebagai koagulan. Semakin banyak massa elektroda yang terurai maka efektivitas penurunan pencemar.

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa:

1. Hasil optimum untuk pengurangan zat warna *remazol red* yaitu tegangan listrik 10 volt, jarak antar elektroda 2 cm dan waktu kontak 60 menit.
2. Pada penelitian ini efektifitas pengurangan mencapai 80 % dengan hasil akhir konsentrasi COD 54 mg/L, TSS sebesar 277 mg/L dan warna 75,5 PtCo.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Allah SWT, Ir. Agus Prasetya M.Sc.,Ph.D, Dr. Sarto.,M.Sc, Teman-teman MTPPL UGM 2014, Orang Tua saya, Fajar Rubiyanto, Adhyastha Pramudya, Pihak Laboratorium UII Yogyakarta dan berbagai pihak yang tidak dapat saya sebutkan satu per satu.

DAFTAR PUSTAKA

1. Al-Kdasi, A., Idris, A., Saed, K. and Guan, C.T.,. "Treatment of textile wastewater by advanced oxidation processes". Global Nest the Int.J. 6: 222-230, diakses dalam http://www.gnest.org/journal/Vol6_No3/Al-kdasi-222-230.pdf, (2004).
2. Bukhari, Alaadin.A. 2008. "Investigation of electrocoagulation treatment process for the removal of total suspended solid and turbidity from municipal wastewater". Journal of Bioresource Technology 99 914-921, (2008).
3. Can˜izares, P., Jime´nez, C., Martı´nez, F., Sa´ez, C., and Manuel A. Rodrigo. 2007. "Study of the Electrocoagulation

- Process Using Aluminum and Iron Electrodes*". SpainInd. Eng. Chem. Res., 46, 6189-6195, (2007).
4. Dewi, Ratna. Kajian Penggunaan Metode Elektrokoagulasi Untuk Penyisihan COD dan Turbidity Dalam Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit. Jurnal Teknik Kimia Politenik Negeri Lhokseumawe Vol. 7 No.16, Desember 2009. ISSN 1693-248X, (2009.)
 5. Golder A.K, Samanta A.N, and Ray.S.. "Removal of trivalent chromium by electrocoagulation". Journal Separation Purification Technology 53 (2007) 33-41.
 6. Hari, B. dan Harsanti, M., "Pengolahan Limbah Cair Tekstil Menggunakan Proses Elektrokoagulasi dengan Sel Al-Al", ISSN 1693-4393, Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia "Kejuangan" (2010).
 7. Hendrianti, Evy dan Angelina Puspita Sandy.. "Pengaruh Jenis Elektroda dan Jarak Antar Elektroda Dalam Penurunan COD Dan TSS Limbah Laundry Menggunakan Elektrokoagulasi Konfigurasi Monopolar Aliran Kontinyu". Lingkungan Tropis Vol 4 no. 2, September 2010 : 73-80, (2010).
 8. Holt, Peter Kevin. "Electrocoagulation : Unravelling and Synthesising The Mechanisme Behind A Water Treatment Process. Thesis. Chemical Engineering. University of Sydney. Sydney, (2002)..
 9. Irene, Shildia. Penurunan *Chemical Oxygen Demand* (COD) Pada Berbagai Macam Limbah Melalui Elektrokoagulasi. Kimia. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam. Universitas Padjajaran. Jatinangor., (2014)
 10. Kobya, M., Bayramoglu, M., and Murat Eyvaz. 2007. "Techno-economical evaluation of electrocoagulation for the textile wastewater using different electrode connections". Journal of Hazardous Materials 148 311-318, (2007).
 11. Lestari, Novianti Dwi dan Agung, Tuhu. "Penurunan TSS dan Warna Limbah Industri Batik Secara Elektrokoagulasi. Jurnal Ilmiah Teknik Lingkungan Volume 6 No.1., 2014.
 12. Mollah, Mohammad Y.A *et al.* *Treatment of orange II azo dye by electrocoagulation (EC) technique in a continuous flow cell using sacrificial iron electrode.* Journal of Hazardous material B109 (2004) 165-171.USA, 2004.
 13. Prayitno, Kismolo, dan Endro. Percobaan Awal Proses Elektrokoagulasi Sebagai Metode Alternatif Pada Pengolahan Limbah Cair. Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah. Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan-Batan. Yogyakarta, (2012).
 14. R.Ramesh Babu, N.S. Bhadrinarayana, K.M.Meera Sheriffa Begum, Anantharaman N. "Treatment Of Tannery Wastewater By Electrocoagulation". Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy. Vol 42 No: 2, 2007 p: 201-206, (2007).
 15. Ringo, Elfridawati Siringo., Ali Kusrijadi & Yayan Sunarya. "Penggunaan metode elektrokoagulasi pada pengolahan limbah industri penyamakan kulit menggunakan aluminium sebagai *sacrificial electrode*". Jurnal Sains dan Teknologi Kimia Volume 4 No. 2 Halaman 96-107, (2013)..
 16. Saptarini, Dyah. Pengolahan limbah cair industri batik dengan metode koagulasi-flokulasi dan adsorpsi sistem batch. Tesis. Program Studi Magister Sistem Teknik. Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta, (2009).
 17. Wiranata, Supratto. Pengolahan limbah elektronik. Makalah. Program Studi Teknik Kimia. Itenas. Bandung, (2014).
 18. Yulianto, Andik, dkk.. Pengolahan Limbah Industri Batik Pada Skala Laboratorium dengan Menggunakan Metode Elektrokoagulasi. Jurnal Volume 5 No. 1, Juni 2009. Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta, (2009)
 19. Zuhria, Faida. Penurunan COD, BOD dan TSS Limbah Cair Pewarna Industri Batik Rara Djonggrang dengan Metode Elektrokoagulasi. Tesis. Teknik Kimia. Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta, (2014).

PENGELOLAAN LIMBAH RADIOAKTIF PADA UNIT PELAYANAN KEDOKTERAN NUKLIR DIAGNOSTIK *IN VIVO*

Suhaedi Muhammad¹, Susyati², Rr.Djarwanti,RPS³

^{1,2}Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi, Kawasan Nuklir Pasar Jumat, Jakarta 12440

³Pusat Teknologi Radioisotop dan Radiofarmaka, Kawasan Nuklir Serpong, Serpong 15310

email : suhaedi.muhammad62@gmail.com

ABSTRAK

PENGELOLAAN LIMBAH RADIOAKTIF PADA UNIT PELAYANAN KEDOKTERAN NUKLIR DIAGNOSTIK *IN VIVO*. Kegiatan pelayanan di unit kedokteran nuklir diagnostik *in vivo* akan menghasilkan limbah radioaktif bentuk padat terbakar, padat terkompaksi, cair, zat/sumber radioaktif terbungkus dan generator Mo-99/Tc-99m yang tidak digunakan lagi. Agar limbah radioaktif yang dihasilkan tersebut terkelola dengan baik demi memproteksi/melindungi dan menjamin keselamatan personil/pekerja radiasi, pasien/masyarakat dan lingkungan dari paparan radiasi, maka pihak pemegang izin (PI) selaku penghasil limbah radioaktif, berkewajiban melakukan pengumpulan dan pengelompokan limbah radioaktif sesuai dengan Pasal 7 Peraturan Pemerintah Nomor 61 Tahun 2013 tentang Pengelolaan Limbah Radioaktif dan Pasal 4 & 22 Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN) Nomor 8 Tahun 2016 tentang Pengolahan Limbah Radioaktif Tingkat Rendah dan Tingkat Sedang. Jika limbah radioaktif terkumpul dan terkelompokan tersebut tidak langsung dikirim ke Pusat Teknologi Limbah Radioaktif - Badan Tenaga Nuklir Nasional (PTLR - BATAN), maka PI berkewajiban menyimpan sementara di dalam ruang penyimpanan khusus yang memenuhi syarat. Jika limbah radioaktif terkumpul dan terkelompokan tersebut akan dikirim ke PTLR - BATAN, maka PI berkewajiban memenuhi ketentuan tentang pengangkutan limbah/zat radioaktif.

Kata Kunci : pengelolaan limbah radioaktif, unit pelayanan kedokteran nuklir diagnostik *in vivo*

ABSTRACT

RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT OF NUCLEAR MEDICINE IN VIVO DIAGNOSTIC SERVICES UNIT. Activities in the in vivo diagnostic nuclear medicine services unit will produce radioactive waste either in solid burned form, solid compacted, liquid, unused sealed radioactive source/substance and unused Mo-99/Tc-99m generator. In order for making those radioactive waste to be properly managed to protect and ensure the safety of personnel/radiation workers, patients/communities and the environment from radiation exposure, the permit holder (PI) as a radioactive waste producer obligated to conduct the collection and classification of radioactive waste in accordance with Article 7 of Government Regulation No. 61 of 2013 on Radioactive Waste Management and Article 4 & 22 of Regulation of The head of Nuclear Energy Regulatory Agency (BAPETEN) Number 8 Year 2016 on Low and Medium Level Radioactive Waste Treatment. If the classified collected radioactive waste is not directly sent to the Radioactive Waste Technology Center - National Nuclear Energy Agency (PTLR - BATAN), PI obliged to store it temporarily in a storage room which fulfills the requirements. If the classified collected radioactive waste will be sent to PTLR - BATAN, PI obliged to fulfill the provisions on the of radioactive waste/substances transportation

Keywords :radioactive waste management, nuclear medicine diagnostic in vivo services unit

PENDAHULUAN

Keputusan Menteri Kesehatan RI No. 008/Menkes/SK/I/2009 tentang Standar Pelayanan Kedokteran Nuklir di Sarana Pelayanan Kesehatan menyatakan bahwa ruang lingkup pelayanan medis di Bagian/Instalasi Kedokteran Nuklir meliputi diagnosis penyakit, pengobatan penyakit dan konsultasi medis.[1]

Pelayanan diagnosis penyakit memiliki 3 cabang, yaitu diagnostik *in vivo*, *in vitro* dan *in vitro*. Pelayanan kedokteran nuklir diagnostik *in vivo* adalah pelayanan diagnostik dengan cara memberikan preparat radionuklida dan/atau radiofarmaka kepada pasien, secara oral, parenteral atau inhalasi, kemudian dengan

menggunakan alat cacah penghasil non citra organ (misalnya renograf) atau alat cacah penghasil citra organ (misalnya kamera gama) dilakukan pengamatan terhadap radionuklida dan/atau radiofarmaka tersebut selama berada di dalam tubuh pasien. Hasil yang diperoleh berupa non citra (misalnya grafik aktivitas vs waktu) dan citra (misalnya gambar organ)[1].

Kegiatan pelayanan kedokteran nuklir diagnostik *in vivo* akan menghasilkan beberapa jenis limbah radioaktif. Untuk itu guna menjamin keselamatan dan kesehatan baik bagi personil, masyarakat maupun lingkungan, maka sesuai yang ditetapkan di dalam Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN)

Nomor 8 tahun 2016 tentang Pengolahan Limbah Radioaktif Tingkat Rendah Dan Tingkat Sedang, pemegang izin selaku pihak penghasil limbah wajib melakukan prapengolahan dan penyimpanan sementara limbah radioaktif yang dihasilkannya [2].

Kegiatan prapengolahan sebagaimana disebutkan di dalam Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN) Nomor 8 tahun 2016 pasal 22 ayat 1 meliputi kegiatan pengumpulan dan pengelompokan. Selanjutnya di dalam pasal 24 Peraturan Pemerintah Nomor 61 Tahun 2013 tentang Pengelolaan Limbah Radioaktif disebutkan bahwa Penghasil Limbah Radioaktif wajib melakukan penyimpanan sementara setelah pengolahan zat radioaktif terbuka yang tidak digunakan sebelum diserahkan kepada BATAN [2,3].

METODOLOGI

Bahan acuan yang digunakan untuk penyusunan tulisan tentang pengelolaan limbah radioaktif di unit pelayanan kedokteran nuklir diagnostik *in vivo* adalah dokumen Keputusan Menteri Kesehatan RI No. 008/Menkes/SK/I/2009 tentang Standar Pelayanan Kedokteran Nuklir di Sarana Pelayanan Kesehatan, dokumen Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 17 Tahun 2012 tentang Keselamatan Radiasi Dalam Kedokteran Nuklir, dokumen Peraturan Pemerintah Nomor 61 Tahun 2013 tentang Pengelolaan Limbah Radioaktif, dokumen Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013 tentang Proteksi dan Keselamatan Radiasi dalam Pemanfaatan Tenaga Nuklir dan dokumen Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 8 Tahun 2016 tentang Pengolahan Limbah Radioaktif Tingkat Rendah dan Tingkat Sedang [1,2,3,4,5].

Metode yang digunakan adalah :

1. Kajian berdasarkan dokumen-dokumen tersebut di atas.
2. Kajian berdasarkan pengalaman penulis pada pengelolaan limbah radioaktif di unit pelayanan kedokteran nuklir diagnostik *in vivo* dan Instalasi Produksi Radioisotop dan Radiofarmaka.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kategori dan jenis limbah radioaktif di unit pelayanan kedokteran nuklir diagnostik *in vivo*.

Penggunaan preparat radionuklida dan/atau radiofarmakadi unit pelayanan kedokteran nuklir diagnostik *in vivo* akan menghasilkan limbah radioaktif yang masuk

dalam kategori padat dan cair, dengan perincian sebagai berikut :

1. Limbah radioaktif padat terbakar, yang dihasilkan dari penggunaan produk larutan NaI-131 Oral, larutan NaI-131 Injeksi, larutan Hippuran I-131, kapsul I-131, Generator Tc-99m, kit kering radiofarmaka berbasis Tc-99m dan produk radiofarmaka siap pakai lainnya yang memiliki kategori tingkat aktivitas rendah dan waktu paruh sedang. Limbah radioaktif padat terbakar ini berupa kardus pembungkusan luar, label bungkus, *packaging foam*, kertas merang, kertas tissue, plastik pembungkusan *syringe*, *syringe* (tanpa jarum suntik), kapas alkohol / *alcohol swab*, sarung tangan, facemask/masker, dan lain-lain.
2. Limbah radioaktif padat terkompaksi, yang dihasilkan dari penggunaan produk larutan NaI-131 Oral, larutan NaI-131 Injeksi, larutan Hippuran I-131, kapsul I-131, Generator Tc-99m, kit kering radiofarmaka berbasis Tc-99m dan produk radiofarmaka siap pakai lainnya yang memiliki kategori tingkat aktivitas rendah dan waktu paruh sedang. Limbah radioaktif padat terkompaksi ini berupa kaleng kemasan luar, vial, botol, sisa kapsul NaI-131, jarum suntik, plat TLC bekas, *disposable tip* dan lain-lain.
3. Limbah radioaktif cair, yang dihasilkan dari penggunaan produk larutan NaI-131 Oral, larutan NaI-131 Injeksi, larutan Hippuran I-131, kapsul I-131, Generator Tc-99m, kit kering radiofarmaka berbasis Tc-99m dan produk radiofarmaka siap pakai lainnya yang memiliki kategori tingkat aktivitas rendah dan waktu paruh sedang. Limbah radioaktif cair ini berupa sisa larutan NaI-131, sisa larutan injeksi radiofarmaka berbasis Tc-99m, sisa larutan injeksi radiofarmaka lainnya (yang dikeluarkan dari vial dengan menggunakan *syringe*), eluen kromatografi lapisan tipis bekas dan hasil pencucian tangan petugas dan pencucian peralatan.

Pengumpulan Dan Pengelompokan Limbah

Sesuai yang tercantum pada Pasal 4 Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 8 tahun 2016 pihak penghasil limbah berkewajiban melakukan kegiatan pra pengolahan yang meliputi kegiatan pengumpulan dan pengelompokan [2].

Peralatan pra pengolahan limbah

Untuk keperluan pra pengolahan (pengumpulan dan pengelompokan) limbah radioaktif yang dihasilkan dari kegiatan pelayanan kedokteran nuklir diagnostik *in vivo* dibutuhkan peralatan sebagai berikut :

1. Peralatan petugas yang menangani limbah radioaktif : pakaian kerja, sepatu/sandal kerja, sarung tangan, *facemask*/masker, alat monitor dosis radiasi personal (*TLD-badge*).
2. *Surveymeter*, untuk mengukur paparan radiasi dan kontaminasi.
3. Wadah/kontener ukuran sekitar 50 liter dengan tutup yang dapat dibuka dengan sistem injakan kaki yang bagian dalamnya sudah dilapisi dengan kantong plastik, untuk menampung limbah padat terbakar dan limbah padat terkompaksi secara terpisah.
4. Jerigen ukuran sekitar 2-5 liter, untuk menampung limbah cair yang berasal dari sisa larutan injeksi yang dikeluarkan dari vial atau botol.
5. Tangki ukuran sekitar 50-100 liter, untuk menampung limbah cair yang berasal dari pencucian tangan petugas dan pencucian peralatan (Bagi unit pelayanan kedokteran nuklir diagnostik *in vivo* yang tidak memiliki wastafel dengan penampungan air kotor/*septic tank* aktif).
6. Perisai radiasi, dapat berupa lembaran Pb atau batu bata Pb (*leadbrick*).
7. Pinset / tang penjepit panjang untuk memindahkan botol, vial dan lain-lain.
8. Rambu-rambu radiasi, tiang statif kuning dan rantai kuning.
9. Label identitas sesuai kategori limbah radioaktif.
10. Label pengiriman limbah radioaktif.

Penempatan Wadah Penampung Limbah Radioaktif.

Wadah tempat penampungan limbah radioaktif di daerah kerja unit pelayanan kedokteran nuklir diagnostik *in-vivo* harus ditempatkan di lokasi yang telah ditentukan, letaknya tidak boleh terlalu dekat dengan lalu lintas orang. Wadah tempat penampungan limbah radioaktif yang harus disediakan terdiri dari wadah limbah radioaktif padat terbakar dan wadah limbah radioaktif padat terkompaksi (drum berukuran 60 liter yang bagian dalamnya sudah dilapisi kantong plastik limbah) dan wadah limbah cair (jerigen tahan asam dengan ukuran 20 liter).

Pada bagian atas tutup drum tempat limbah padat terbakar harus ditulis “ Tempat Limbah

Radioaktif Padat Terbakar”, begitupun pada bagian atas tutup drum tempat limbah padat terkompaksi harus ditulis “ Tempat Limbah Radioaktif Padat Terkompaksi”. Pada bagian atas jerigen harus ditulis “ Tempat Limbah Radioaktif Cair”.

Sedangkan untuk penampungan limbah radioaktif cair hasil pencucian tangan dan peralatan harus disiapkan tangki penampung khusus limbah radioaktif tidak boleh dicampur dengan tempat penampungan limbah air pada umumnya. Misalnya dengan menyediakan wastafel khusus (wastafel aktif) yang bagian bawahnya dilengkapi dengan tangki penampung khusus limbah radioaktif cair. Bila tidak disiapkan tangki penampung, maka limbah radioaktif cair hasil pencucian tangan dan peralatan harus ditampung dalam jerigen.

Wadah tempat penampungan limbah padat terkompaksi sebaiknya disediakan 4 jenis yaitu untuk kaleng kemasan luar, untuk vial dan botol kosong, untuk jarum suntik dan untuk limbah padat terkompaksi lainnya.

Untuk melindungi petugas pelaksana dari bahaya radiasi, di tempat wadah limbah dipasang *shielding* radiasi baik berupa lembaran Pb atau *leadbrick* .Di tembok atau tempat lain yang mudah terlihat oleh petugas pelaksana di sekitar tempat wadah limbah harus ditulis informasi “ Masukanlah Limbah Radioaktif Sesuai Dengan Jenis Dan Kategorinya Secara Baik Dan Benar”.

Pemantauan Kondisi Wadah Penampung Limbah Radioaktif Di Daerah Kerja.

Petugas proteksi radiasi (PPR) harus melakukan pemantauan kondisi wadah tempat penampungan limbah radioaktif di daerah kerja minimal seminggu sekali. Adapun ruang lingkupnya meliputi :

1. Pemantauan isi wadah penampung.
Pemantauan isi wadah penampung limbah radioaktif dimaksudkan untuk mengetahui apakah wadah penampung limbah padat terbakar, padat terkompaksi dan cair tersebut sudah penuh atau belum. Jika terdapat wadah penampung limbah radioaktif padat terbakar atau padat terkompaksi yang sudah penuh, maka kantong plastik yang sudah penuh tersebut dibawa ke ruang penyimpanan sementara dan diganti dengan kantong plastik yang baru. Jika terdapat wadah penampung limbah cair yang sudah penuh, maka wadah yang sudah penuh tersebut dibawa ke ruang penyimpanan sementara dan diganti dengan wadah yang baru.
2. Pemantauan laju paparan radiasi.
Pemantauan laju paparan radiasi yang dilakukan baik pada permukaan wadah

penampung limbah radioaktif maupun pada jarak 1 (satu) meter dari permukaan wadah penampung limbah radioaktif dimaksudkan untuk mengetahui apakah laju paparan radiasi di daerah kerja melebihi batas atau tidak. Jika terdapat wadah penampung limbah radioaktif yang laju paparan radiasinya melebihi 200 mR/jam, maka limbah yang terdapat di dalamnya harus segera dibawa ke ruang penyimpanan sementara. Selain itu, PPR juga berkewajiban memantau apakah telah terjadi kontaminasi permukaan (misalnya pada lantai dan obyek lain) atau tidak. Jika terjadi kontaminasi, maka PPR menginstruksikan petugas pelaksana untuk melakukan dekontaminasi dibawah pengawasannya sampai kondisinya bebas kontaminasi dan kembali aman.

3. Pemantauan kesesuaian penampungan limbah.

Pemantauan kesesuaian penampungan limbah dimaksudkan untuk mengetahui apakah penampungan limbah radioaktif telah sesuai dengan kategori dan jenisnya atau tidak. Jika terjadi ketidaksesuaian, maka PPR berkewajiban mengingatkan petugas pelaksana agar memasukan limbah radioaktif pada wadah penampung yang sesuai dengan kategori dan jenis limbahnya.

Penyortiran Limbah Radioaktif Dan Pewadahan.

Limbah radioaktif padat terbakar dan padat terkompaksi yang diambil dari daerah kerja, sebelum dimasukkan ke dalam wadah pengiriman, di gudang penyimpanan sementara terlebih dahulu dilakukan penyortiran oleh PPR. Penyortiran dimaksudkan agar limbah yang akan disimpan dalam wadah pengiriman telah benar-benar sesuai dengan kategori dan jenisnya, tidak saling bercampur satu sama lain. Setelah disortir dan dimasukkan ke dalam wadah pengiriman, dilakukan pemampatan/pemadatan agar isinya optimal dan diberi label sesuai ketentuan.

Penyimpanan Sementara

Apabila wadah yang berisi limbah radioaktif baik padat terbakar, padat terkompaksi maupun limbah cair di dalam jerigen yang sudah dilabel dan belum dikirim ke PTLR-BATAN, maka harus disimpan sementara terlebih dahulu di gudang penyimpanan. Penempatan wadah yang berisi limbah radioaktif di dalam gudang penyimpanan harus diatur sedemikian rupa sehingga nilai laju paparan radiasi pada permukaan pintu, dinding samping kiri dan kanan juga belakang nilainya tidak

mengakibatkan adanya penerimaan dosis radiasi yang melebihi nilai batas dosis untuk masyarakat umum (1 mSv). Pada bagian depan pintu gudang penyimpanan harus ditulis/diberi informasi “ Gudang Penyimpanan Limbah Radioaktif “ dan dipasang tanda bahaya radiasi. Pintu gudang penyimpanan harus selalu tertutup rapat dan terkunci, dimana kuncinya harus dipegang dan disimpan oleh PPR.

Pemantauan di Ruang Penyimpanan Sementara Limbah Radioaktif.

Dalam rangka mengetahui adanya potensi bahaya radiasi pada ruang penyimpanan sementara limbah radioaktif agar tidak menimbulkan dampak radiologi pada manusia dan lingkungan, maka PPR berkewajiban memantau laju paparan radiasi baik pada permukaan maupun pada jarak 1 (satu) meter dari permukaan bagian depan, samping kanan, samping kiri dan bagian belakang ruang penyimpanan sementara dengan frekuensi minimal 1 (satu) kali seminggu. Hasil pemantauan ini harus tercatat dalam lembar pemantauan yang merupakan bagian yang tak terpisahkan dari laporan pengelolaan limbah radioaktif.

Pengiriman Limbah Radioaktif Ke BATAN

Pengiriman limbah radioaktif ke PTLR-BATAN harus mengikuti ketentuan pengiriman yang telah ditetapkan. Pihak institusi yang membawahi unit pelayanan kedokteran nuklir diagnostik *in vivo*/pihak rumah sakit terlebih dahulu mengirim surat secara resmi kepada Kepala Pusat Teknologi Limbah Radioaktif - BATAN perihal rencana pengiriman limbah radioaktif dengan menyebutkan jenis dan jumlah limbah yang akan dikirim.

Wadah yang berisi limbah radioaktif yang akan dikirim ke PTLR-BATAN baik padat terbakar, padat terkompaksi maupun jerigen yang berisi limbah cair oleh PPR terlebih dahulu dipastikan bebas kontaminasi agar tidak terjadi penyebaran kontaminasi baik saat dibawa dari gudang penyimpanan ke kendaraan pengangkut maupun ketika dilakukan pengangkutan ke PTLR-BATAN.

Untuk rumah sakit yang memiliki tangki penampungan limbah radioaktif cair, pemindahan limbah radioaktif cair dari tangki penampung ke kendaraan tangki pengangkut yang diawasi oleh PPR harus dilakukan secara hati-hati agar tidak berceceran dan tidak mengakibatkan terjadinya penyebaran kontaminasi di sekitar lokasi pemindahan.

Sedangkan untuk pengiriman kontener bekas wadah botol vial yang berisi larutan

senyawa bertanda ke pihak produsen, maka guna menghindari terjadinya penyebaran kontaminasi, masing-masing kontener harus dimasukkan ke dalam kantong plastik ukuran setengah kilogram, baru dimasukkan ke dalam kardus atau peti kayu yang memenuhi syarat pengiriman.

Untuk pengiriman kembali produk Generator Tc-99m yang telah habis masa pakainya (sudah tidak digunakan) ke pihak produsen, guna menghindari terjadinya kontaminasi, Generator Tc-99m harus dimasukkan kembali ke dalam kardus pembungkus semula dan dilakukan pembungkusan serta pelabelan sesuai ketentuan pengiriman limbah radioaktif.

KESIMPULAN

Kegiatan pelayanan kedokteran nuklir diagnostik *in vivo* menghasilkan jenis limbah radioaktif padat terbakar, padat terkompaksi dan cair dengan tingkat rendah sampai sedang dan waktu paruh pendek dan sedang. Melihat dari jenis dan kategorinya, pelaksanaan pengelolaan limbah radioaktif hasil kegiatan pelayanan kedokteran nuklir diagnostik *in vivo* ini relatif tidak begitu rumit namun tetap harus mengacu pada ketentuan yang ditetapkan di dalam Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 8 Tahun 2016 dan Peraturan Pemerintah Nomor 61 Tahun 2013 agar tidak menimbulkan dampak radiologi baik bagi pekerja, masyarakat dan lingkungan sekitar.

DAFTAR PUSTAKA

1. Kementerian Kesehatan, Keputusan Menteri Kesehatan RI No. 008/Menkes/SK/I/2009 tentang Standar Pelayanan Kedokteran Nuklir di Sarana Pelayanan Kesehatan, Jakarta, 2009.
2. Badan Pengawas Tenaga Nuklir, Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 8 Tahun 2016 Tentang tentang Pengolahan Limbah Radioaktif Tingkat Rendah Dan Tingkat Sedang, Jakarta, 2016.
3. Sekretariat Negara, Peraturan Pemerintah Nomor 61 Tahun 2013 tentang Pengelolaan Limbah Radioaktif, Jakarta, 2013.
4. Badan Pengawas Tenaga Nuklir, Peraturan Kepala badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 04 Tahun 2013 Tentang Proteksi dan Keselamatan Radiasi dalam Pemanfaatan Tenaga Nuklir, Jakarta, 2013.
5. Badan Pengawas Tenaga Nuklir, Peraturan Kepala badan Pengawas Tenaga Nuklir

Nomor 17 Tahun 2012 Tentang Keselamatan Radiasi Dalam Kedokteran Nuklir, Jakarta, 2012.

PROFIL PENYISIHAN Cs-137 DAN Co-60 DALAM FILTRAT LIMBAH KIMIA RADIOAKTIF CAIR DENGAN PROSES PENUKAR ION DAN KOAGULASI

Sugeng Purnomo

Pusat Teknologi Limbah Radioaktif, BATAN, Gd. 50, Kawasan Puspiptek Serpong
sugengp@batan.go.id

ABSTRAK

PROFIL PENYISIHAN Cs-137 DAN Co-60 DALAM FILTRAT LIMBAH KIMIA RADIOAKTIF CAIR DENGAN PROSES PENUKAR ION DAN KOAGULASI. Limbah kimia radioaktif cair (LKRC) adalah limbah radioaktif cair (LRC) yang mengandung konstituen kimia dalam konsentrasi relatif tinggi. Limbah ini umumnya berasal dari kegiatan yang menggunakan banyak bahan kimia di laboratorium atau instalasi nuklir. Sampai tahun 2012 terkumpul 2600 liter LKRC di Pusat Teknologi Limbah Radioaktif dan telah dilakukan pengolahan tahap awal dengan proses pengendapan menggunakan soda kaustik. Endapan hidroksida logam yang terbentuk kemudian difiltrasi vakum sehingga terpisahkan 700 liter *sludge* endapan dan 1900 liter filtrat. Filtrat LKRC masih mengandung radioaktifitas 5,18 E-5 mCi/L yang berasal dari Cs-137 dan Co-60 serta radionuklida lainnya. Untuk menurunkan radioaktifitas sampai di bawah batas kriteria limbah, maka dilakukan percobaan penyisihan radionuklida tersebut dengan proses penukar ion dan koagulasi. Laju alir disesuaikan sehingga memberikan waktu tinggal 9,6 menit dalam bed resin. Untuk menyisihkan Cs-137 dalam tiap liter filtrat LKRC dibutuhkan 200 g resin Lewatit monopulus S 108. Penyisihan Co-60 dapat dicapai dengan koagulasi menggunakan ferosulfat 30 mmol/L pada pH 8 dan 10 mmol/L pada pH 12.

Kata kunci: penyisihan Cs-137 dan Co-60, filtrat, penukar ion, koagulasi.

ABSTRACT

ELIMINATION PROFILE OF Cs-137 AND Co-60 IN CHEMICAL LIQUID RADIOACTIVE WASTE FILTRATE BY ION EXCHANGE AND COAGULATION PROCESS. Chemical liquid radioactive waste (CLRW) is liquid radioactive waste (LRW) containing chemical constituent in relatively high concentration. This waste usually generated by the activity which use a large chemicals in laboratory or nuclear installation. Until 2012 was collected 2600 litre CLRW in Centre for Radioactive Waste Technology and had been treated first by precipitation process use caustic soda. Metal hydroxide precipitate than vacuum-filtrated so 700 litres precipitate sludge and 1900 filtrate were separated. CLRW filtrate still contain radioactivity 5,18 E-5 mCi/L from Cs-137 and Co-60 and other radionuclide. To decreasing radioactivity until lower than waste criteria, so the experiment by ion exchange and coagulation was carry out. Flowrate was set according to give contact time 9,6 minutes in bed resin. To eliminate Cs-137 in each litre CLRW filtrate need 200 g Lewatit monopulus S 108 resin. Elimination of Co-60 can be done by coagulation with ferrosulphate 30 mmole/L at pH 8 and 10 mmole/L at pH 12.

Keywords: elimination of Cs-137 and Co-60, filtrate, ion exchange, coagulation.

PENDAHULUAN

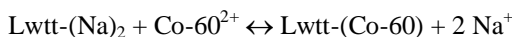
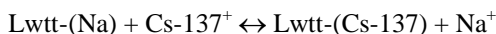
Limbah cair yang berasal dari Laboratorium radioaktif pada umumnya merupakan LKRC. Demikian pula proses produksi I-131 menyisakan limbah yang mengandung kromium konsentrasi tinggi. Sampai tahun 2012 tersimpan 2600 liter LKRC yang berasal dari berbagai laboratorium di BATAN, termasuk dari PT. Tjiwi Kimia dan Lembaga Eijkman RSCM. LKRC tersebut mempunyai pH < 1 dan membentuk endapan bila dinetralisasi, sehingga diperlukan proses pengendapan dalam pengolahannya.

Pengendapan hidroksida merupakan metode yang praktis dan memberi dua manfaat sekaligus yaitu *setting* pH limbah

dan mengendapkan kromium yang terkandung dan berasal dari proses produksi I-131. Dengan menambahkan larutan NaOH 40 % akan terbentuk endapan kromium dan berbagai hidroksida logam, diharapkan radionuklida dapat terjerap dan terkonsentrasi dalam endapan. Pengolahan tahap berikutnya adalah pemisahan endapan dengan filtrasi vakum. Filtrat yang masih mengandung radioaktifitas di atas batas aman pembuangan efluen perlu diolah lanjut[1].

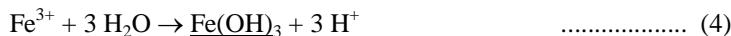
Percobaan evaporasi skala Laboratorium terhadap filtrat LKRC menunjukkan proses pendidihan yang berbeda dengan limbah cair umumnya. Setelah beberapa saat evaporasi

berlangsung, proses pendidihan dan pembentukan destilat melambat dan akhirnya tampak adanya gejala filtrat yang mencapai kondensor sehingga destilat terkontaminasi. Saat percobaan diteruskan fenomena perlambatan pendidihan dan pembentukan destilat terus pula berlangsung dan akhirnya terbentuk tekanan berlebih yang ditandai dengan lepasnya tutup labu destilasi.



Keadaan khusus dari filtrat LKRC yang sangat berpengaruh terhadap proses penukar ion adalah konsentrasi kation dan anion yang relatif tinggi. Keberadaan Na^+ akan menggeser kesetimbangan ke kiri yang berarti menurunkan kemampuan resin menangkap radionuklida, dari kondisi ini dapat diprediksi dalam pengolahan akan membutuhkan lebih banyak resin[2,4,5]. Keberhasilan penyisihan cobalt dan cesium diamati dengan analisis radioaktivitas menggunakan *Multichannel Analyzer*.

Selain proses penukar ion juga dilakukan percobaan pengolahan dengan



Karena cenderung bersifat elektropositif maka flok tersebut akan menarik ion-ion negatif sehingga membentuk mantel negatif dan mempunyai kemampuan mengikat kation di sekitarnya dan membentuk agregat sehingga akhirnya mengendap. Dalam larutan yang cenderung bersifat basa pembentukan flok hidroksida semakin cepat dan diharapkan efektifitas koagulasi radionuklida juga meningkat.

METODOLOGI

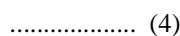
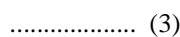
Alat/Bahan

Untuk mengamati karakteristik filtrat LKRC serta penyisihan Cs-137 dan Co-60 di dalamnya, penelitian ini menggunakan instrumen analisis Spektrofotometer, Spektrofotometer Serapan Atom, *Multichannel Analyzer*, pH dan Konduktometer. Bahan yang digunakan antara lain Resin Lewatit Monoplus S 108, ferrosulfat heksahidrat, amonium heptamolibdat, natrium vanadat, barium klorida, gliserin, n-naftil etilen diamin diklorida.

Alternatif pengolahan filtrat LKRC dilakukan dengan proses penukar ion menggunakan resin Lewatit monoplus S 108 dalam operasi kolom. Dengan *setting* laju alir dan pH filtrat LKRC sebagai umpan, diamati kondisi yang memberikan faktor dekontaminasi paling baik. Pengikatan radionuklida yang diharapkan adalah seperti reaksi kesetimbangan berikut [1,2,3]:



proses koagulasi. Koagulasi merupakan pengolahan kimia yang diterapkan secara luas dalam pengolahan limbah cair. Seperti halnya logam-logam berat, radionuklida dapat mengendap bersama saat berlangsungnya agregasi flok dari bahan koagulan. Ferrosulfat heksahidrat atau garam tunjung termasuk bahan koagulan yang umum digunakan, koagulan ini dalam larutan akan mengalami oksidasi dan hidrolisis membentuk flok hidroksida besi sesuai reaksi[1]:



Karakterisasi Filtrat Limbah Kimia Radioaktif Cair

Untuk mengetahui karakteristik filtrat LKRC dilakukan analisis kation (Cr, Cu, Fe, Ni, Co, Zn, Ca, Mg) menggunakan Spektrofotometer Serapan Atom, analisis anion (PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , NO_2^- , Cl^-) menggunakan Spektrofotometer dan Ion-meter, analisis radioaktivitas menggunakan *Multichannel Analyzer*, serta pengukuran sifat kimia fisik sampel (pH, dan daya hantar listrik). Dengan mengetahui konsentrasi kation dalam sampel FLKRC dapat diperkirakan massa ekuivalen resin lewatit yang dibutuhkan untuk proses pengolahan.

A. Percobaan Penukar Ion

Ditimbang 200 g resin Lewatit monoplus S 108 kemudian dimasukkan dalam kolom kromatografi (bahan gelas diameter 4 cm, tinggi 60 cm) menggunakan corong dan dibantu semprot akuades sehingga membentuk bed resin yang terendam sempurna dalam kolom, lalu kolom tersebut

diklem pada statif. Dituang filtrat LKRC melalui corong dan kertas saring kedalam labu corong pisah (*separation funnel*) di atas kolom. Kran pada corong pisah dibuka penuh kran pada bagian bawah kolom dibuka sehingga debit efluen FLKRC keluar kolom 24 mL/menit. Efluen ditampung dalam 5 s/d 10 wadah 500 mL. Seluruh efluen yang diperoleh dan FLKRC di-counting menggunakan *Multichannel Analyzer*. Ditentukan aktifitas dan jenis radionuklida dalam sampel. Percobaan serupa diulangi menggunakan 400 g resin dan debit efluen 48 mL/menit.

B. Percobaan Koagulasi

Filtrat LKRC dikondisikan pada pH 8 dan 12 ditambah larutan ferrosulfat sehingga memberikan konsentrasi 10, 20, 30, 40, dan 50 mmol/L, dilakukan pengadukan 10 menit dengan 120 rpm dan 50 menit dengan 60 rpm. Flok endapan disaring, filtrat di-counting menggunakan *Multichannel Analyzer*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data analisis kation-anion dan radioaktifitas serta pengukuran parameter kimia fisik FLKRC ditunjukkan pada Tabel 1. Dalam data tersebut tampak bahwa FLKRC mengandung beragam konstituen kimia dalam jumlah relatif tinggi, khususnya kation mencapai 9,379 miligram-ekivalen per liter. Dalam proses penyisihan Cs-137 dan Co-60 menggunakan resin kation Lewatit Monoplus S 108, keberadaan kation ini akan sangat membebani resin. Selain daripada itu adanya beragam anion juga memberi pengaruh sehingga mengurangi efektifitas pertukaran ion yang diharapkan.

Percobaan penukar ion skala lab menggunakan kolom resin berukuran diameter 4 cm dan tinggi 60 cm. laju alir ditentukan sesuai dengan kondisi operasi yang direkomendasikan untuk Lewatit monoplus S 108. Untuk mengamati konsentrasi aktifitas filtrat LKRC sebelum dan setelah proses pertukaran ion digunakan *Multichannel Analyzer* seperti ditunjukkan pada Gambar 1.

Tabel 1. Karakteristik FLKRC

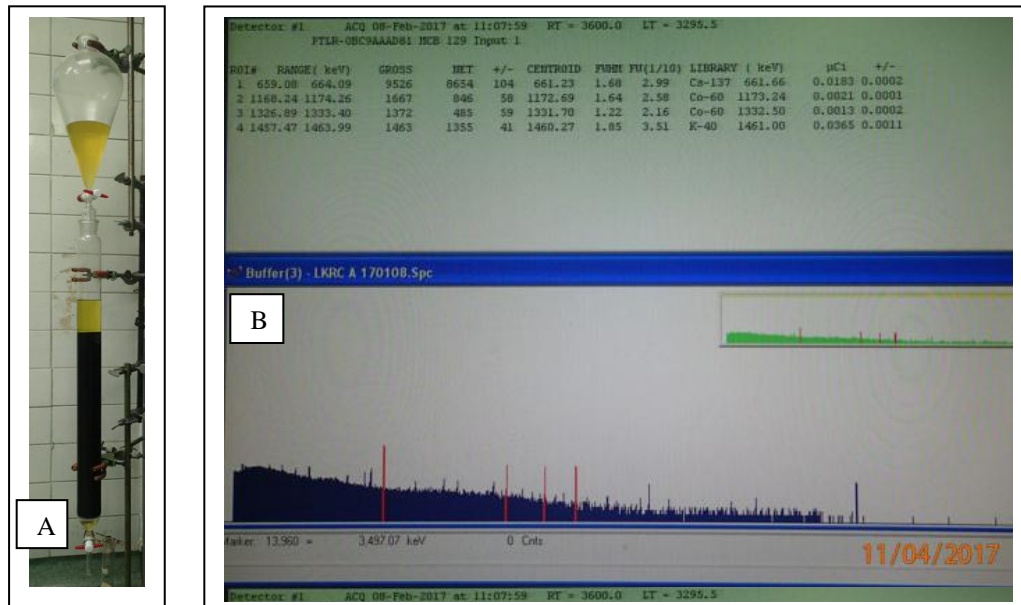
Parameter	Pengukuran/analisis			meq/L
	1	2	3	
pH	8,17	8,51	7,79	
DHL	47,2 mS/cm	45,9 mS/cm	48,6 mS/cm	
Cs-137	3,82E-5 mCi/L	4,98E-5 mCi/L	4,54E-5 mCi/L	
Co-60	0,76E-5 mCi/L	0,54E-5 mCi/L	0,64 E-5 mCi/L	
Cu	18,64 mg/L			0,570
Fe	2,649 mg/L			0,142
Cr	4,265 mg/L			0,246
Zn	3,100 mg/L			0,095
Ca	73,7 mg/L			3,678
Co	1,301 mg/L			0,044
Ni	3,254 mg/L			0,111
Mg	56,500 mg/L			4,648
PO ₄ ³⁻	57,862 mg/L			
SO ₄ ²⁻	23,413 g/L			
NO ₂ ⁻	6,84 mg/L			
Cl ⁻	875 mg/L			
Total				9,379

Percobaan pengolahan menggunakan kolom penukar ion menunjukkan terikatnya Cs-137 oleh resin sampai diperoleh 2 x 500 mL efluen

dengan aktifitas di bawah klirens, berikutnya Cs-137 mulai muncul dalam efluen ke 3 dan kian meningkat konsentrasinya pada efluen ke 4 dan 5.

Hal ini berarti bahwa pada dasarnya Cs-137 dapat terikat oleh resin Lewatit walaupun resin segera jenuh karena beban kation yang tinggi dalam filtrat LKRC. Untuk Co-60 menunjukkan tidak ada penangkapan yang berarti oleh resin, efluen pertama telah mengandung Co-60

sedikit di bawah konsentrasi dalam filtrate LKRC, kemudian pada efluen ke 2 dan seterusnya meningkat dan relatif menyamai konsentrasi influen. Hal ini seperti ditunjukkan pada Tabel 2 dan Gambar 2.



Gambar 1. (A) Kolom penukar ion skala lab, (B) γ spectrum sampel filtrat LKRC

Pada percobaan dengan 400 g Lewatit, diperoleh 4 x 500 mL efluen dengan konsentrasi Cs-137 di bawah klirens. Hal ini memperjelas bahwa penyisihan radiocesium sebanding dengan jumlah resin yang digunakan. Sedangkan untuk Co-60 mempunyai kecenderungan yang sama dengan percobaan pertama yaitu tidak menunjukkan pengikatan oleh

resin karena konsentrasi Na^+ yang sangat tinggi dalam filtrat LKRC (dari soda kaustik yang digunakan pada proses pengendapan LKRC) mendorong reaksi kesetimbangan kearah kiri (persamaan reaksi no. 2) dan memberikan efek yang lebih besar dalam hal menurunnya ikatan resin dan Co-60 dengan muatan $2+$ dibanding terhadap Cs-137[2,4].

Tabel 2. Konsentrasi Aktifitas filtrat LKRC dan efluennya (massa lewatit 200 g)

Sampel	Konsentrasi radionuklida, $\mu Ci/mL$	
	Cs-137	Co-60
Filtrate LKRC	$3,82 \times 10^{-5}$	$0,76 \times 10^{-5}$
Efluen 1	$< 2,00 \times 10^{-7}$	$0,50 \times 10^{-5}$
Efluen 2	$< 2,00 \times 10^{-7}$	$0,76 \times 10^{-5}$
Efluen 3	$1,80 \times 10^{-5}$	$0,74 \times 10^{-5}$
Efluen 4	$1,82 \times 10^{-5}$	$0,74 \times 10^{-5}$
Efluen 5	$3,14 \times 10^{-5}$	$0,74 \times 10^{-5}$

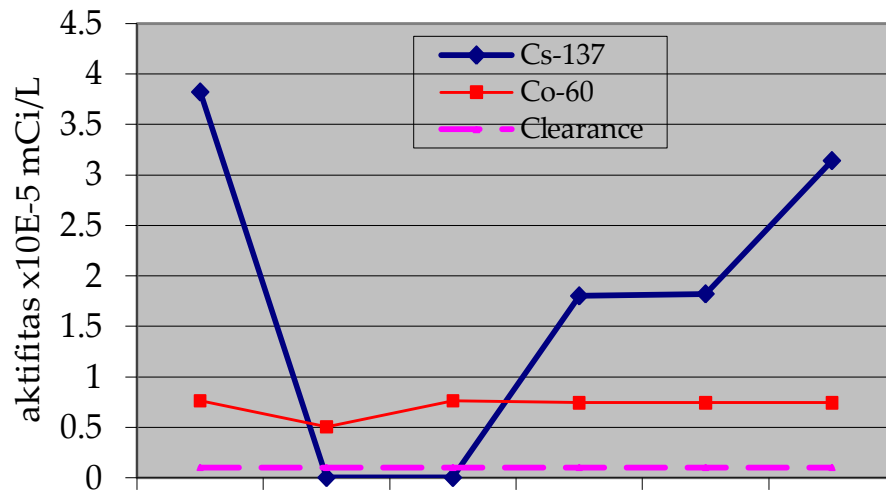
Pada Gambar 2 dan 3 tampak profil kurva *breakthrough* Cs-137; saat awal pengumpanan FLKRC melalui bed resin

diperoleh efluen yang bebas radiocesium. Setelah resin mulai jenuh maka konsentrasi aktifitas Cs-137 dalam efluen

berangsur meningkat sampai akhirnya sama dengan aktifitas awal. Pada Gambar 3, dengan mengamati lebih banyak sampel memberikan profil daerah *breakthrough* yang lebih jelas.

Percobaan koagulasi menggunakan ferrosulfat memberikan hasil penyisihan Cs-137 dan Co-60 yang ditunjukkan Tabel 4. Profil penyisihan cesium dan cobalt dapat dilihat pada Gambar 4 yang menunjukkan bahwa konsentrasi aktivitas Cs-137 dalam limbah, khususnya untuk

pH 8 menurun secara perlahan sesuai dengan dosis koagulan. Pada percobaan dengan pH 12 konsentrasi Cs-137 menurun tajam pada dosis 10 mmol/L dan kemudian menurun perlahan seperti halnya pada pH 8. Hal ini menunjukkan bahwa pada pH 12 yang berarti konsentrasi ion hidroksil lebih tinggi menyebabkan pembentukan flok feri hidroksida dan agregasinya lebih cepat, begitu pula dengan pembentukan mantel negatif ion hidroksida dalam agregat flok.



Gambar 2. Aktifitas FLKRC dan efluennya (percobaan menggunakan 200 g lewatis)

Dengan demikian maka efek elektrostatis yang ditimbulkan terhadap Cs-137 dalam bentuk kation cesium menjadi lebih besar dan koagulasi berlangsung lebih efektif.

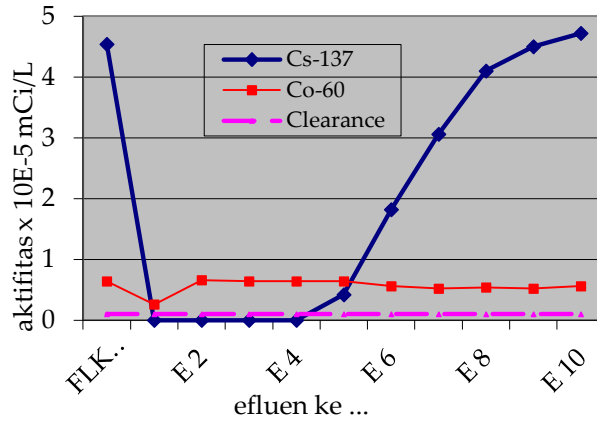
Namun demikian kedua seri percobaan tersebut belum dapat menurunkan konsentrasi Cs-137 sampai di bawah klierens.

Tabel 3. Konsentrasi Aktifitas FLKRC dan efluennya (massa lewatis 400 g)

Sampel	Konsentrasi radionuklida, $\mu\text{Ci/mL}$	
	Cs-137	Co-60
Filtrate LKRC	$4,54 \times 10^{-5}$	$0,64 \times 10^{-5}$
Efluen 1	$< 2,00 \times 10^{-7}$	$0,26 \times 10^{-5}$
Efluen 2	$< 2,00 \times 10^{-7}$	$0,66 \times 10^{-5}$
Efluen 3	$< 2,00 \times 10^{-7}$	$0,64 \times 10^{-5}$
Efluen 4	$< 2,00 \times 10^{-7}$	$0,64 \times 10^{-5}$
Efluen 5	$0,42 \times 10^{-5}$	$0,64 \times 10^{-5}$
Efluen 6	$1,82 \times 10^{-5}$	$0,56 \times 10^{-5}$
Efluen 7	$3,06 \times 10^{-5}$	$0,52 \times 10^{-5}$
Efluen 8	$4,10 \times 10^{-5}$	$0,54 \times 10^{-5}$
Efluen 9	$4,50 \times 10^{-5}$	$0,52 \times 10^{-5}$
Efluen 10	$4,72 \times 10^{-5}$	$0,56 \times 10^{-5}$

Untuk Co-60 dengan konsentrasi awal yang memang lebih rendah dari Cs-137, mengalami penurunan hingga di bawah klierens dengan konsentrasi koagulan 10 mmol/L untuk pH 12 dan 30 mmol/L untuk pH 8. Secara umum terdapat pola penyisihan yang identik di antara kedua

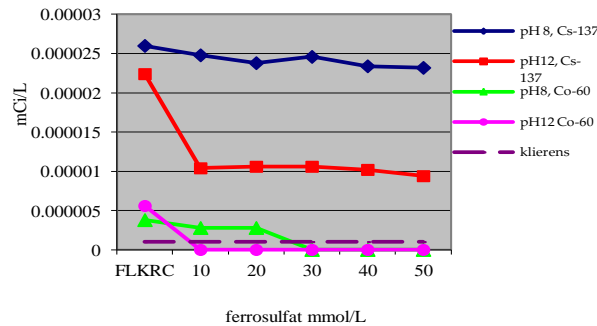
radionuklida tersebut. Pada pH 8 terjadi penurunan perlahan sesuai dosis koagulan dan pada pH 12 berlangsung penurunan konsentrasi cukup tajam dengan dosis koagulan 10 mmol/L dan kemudian penurunan perlahan dengan penambahan dosis koagulan.



Gambar 3. Aktifitas FLKRC dan efluennya (percobaan menggunakan 400 g lewatif)

Tabel 4. Data percobaan koagulasi

Koagulan	Cs-137, mCi/L		Co-60, mCi/L	
	pH 8	pH 12	pH 8	pH 12
Kondisi Awal	0,0000260	0,0000224	0,0000038	0,0000056
10 mmol/L	0,0000248	0,0000104	0,0000028	< 2,00 x 10 ⁻⁷
20 mmol/L	0,0000238	0,0000106	0,0000028	< 2,00 x 10 ⁻⁷
30 mmol/L	0,0000246	0,0000106	< 2,00 x 10 ⁻⁷	< 2,00 x 10 ⁻⁷
40 mmol/L	0,0000234	0,0000102	< 2,00 x 10 ⁻⁷	< 2,00 x 10 ⁻⁷
50 mmol/L	0,0000232	0,0000094	< 2,00 x 10 ⁻⁷	< 2,00 x 10 ⁻⁷



Gambar 4. Profil penyisihan Cs-137 dan Co-60

3. Dibandingkan volume limbah yang diolah, volume resin relative lebih kecil sehingga masih ada reduksi volume.

KESIMPULAN

Cs-137 dalam FLKRC dapat disisihkan dengan proses penukar ion menggunakan resin Lewatit monopulus S 108 sampai di bawah nilai klirens. Resin yang dibutuhkan sebanyak 200 g per liter filtrat LKRC karena kandungan beragam konstituen kimia yang sangat membebani resin. Co-60 dapat disisihkan dengan proses koagulasi menggunakan ferrosulfat dengan dosis 30 mmol/L pada pH 8 dan 10 mmol/L pada pH 12. Pengolahan filtrat LKRC dapat dilakukan dengan kedua proses tersebut secara bertahap.

DAFTAR PUSTAKA

1. G.H. Jeffery, J. Bassett, J. Mendham, R.C. Denney, *Vogel's Textbook Of Quantitative Chemical Analysis Fifth Edition*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1989.
2. C.E. Harland, *Ion Exchange Theory and Practice, 2nd ed.*, The Royal Chemistry Society, Cambridge, UK, 1994.
3. Friedrich Helfferich, *Ion Exchange*, Dofer Publications Inc., New York, 1995.
4. M.J. Slater, *Principle of Ion Exchange Technology*, Butterworth-Heinemann Ltd., Oxford, 1991.
5. M. Douglas LeVan, Giorgio Carta, Carmen M. Yon, *Adsorption and Ion Exchange* The McGraw-Hill Companies Inc., 1999.

Tanya Jawab

Penanya : Rosika K.

Pertanyaan :

1. Apa jenis resin yang digunakan ?
2. Berapa batas radioaktivitas radionuklida yang sudah disisihkan yang diijinkan ?
3. Apakah penambahan resin, koagulasi tidak menambah volume limbah ?

Jawaban :

1. Menggunakan resin lewatit monopulus S 108.
2. Untuk dilepas le lingkungan, tingkat radioaktivitas harus kurang dari 10^{-6} mCi/L.

PEMANTAUAN RADIOAKTIVITAS DALAM AIR HUJAN TAHUN 2016

Leli Nirwani, R Buchari, Wahyudi dan Mujiwiyono

Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi – BATAN

Jl. Lebak Bulus Raya No.49, Cilandak, Jakarta Selatan

leli_n@batan.go.id

ABSTRAK

PEMANTAUAN RADIOAKTIVITAS DALAM AIR HUJAN TAHUN 2016. Telah dilakukan pemantauan cemaran radioaktif lingkungan dari jatuhnya polutan radioaktif dengan mengukur konsentrasi α total, β total, ^{137}Cs , ^{226}Ra dan ^{40}K dalam air hujan. Tujuan pemantauan ini untuk mengetahui status terkini polutan radioaktif di Indonesia. Pemantauan dilakukan dengan cara menampung air hujan secara langsung menggunakan corong dalam jerigen dengan penyangga kotak kayu di 6 lokasi yaitu Jakarta dan Serpong setiap bulan, sedangkan Bukittinggi, Pontianak, Makassar dan Kupang dilakukan penampungan air hujan setiap tiga bulan selama tahun 2016. Analisis α total dan β total dilakukan dengan menguapkan sampel air hujan dan dikeringkan dalam planset, selanjutnya diukur dengan LBC (Low Background Counter). Analisis ^{137}Cs , ^{226}Ra dan ^{40}K dalam air hujan dilakukan dengan memekatkan sampel air hujan. Selanjutnya diukur dengan Spektrometer Gamma. Hasil pengukuran menunjukkan polutan radioaktif konsentrasi α total dan β total dalam sampel air hujan di Jakarta, Serpong, Bukittinggi, Pontianak, Makassar dan Kupang masih dibawah nilai Minimum Detectable Concentration (MDC) alpa total adalah 0.0057 (Bq/l) dan MDC beta total adalah 0.0119 (Bq/l). Sedangkan konsentrasi ^{137}Cs , ^{226}Ra dan ^{40}K dalam sampel air hujan juga menunjukkan dibawah nilai Minimum Detectable Concentration (MDC).

Kata kunci : α total dan β total, ^{40}K , ^{137}Cs dan ^{226}Ra , air hujan

ABSTRACT

MEASUREMENT OF RADIOACTIVITY IN RAIN FALL FOR 2016. It has been conducted measurement of environment radioactive pollutants from fall out by monitoring of α total, β total, ^{137}Cs , ^{226}Ra and ^{40}K . The aim of the monitoring is to get current status of environmental base data of radioactive pollutants in Indonesia. Radioactive pollutants monitoring in rain fall was conducted by direct collecting via funnel and jerry can which was supported by wood box at 6 location i.e. Jakarta and Serpong were collected for one month, and Bukittinggi, Pontianak, Makassar and Kupang collected for three months in 2016. Analysis of gross α and gross β in rain fall was carried out by evaporation and drying in planchet, and then was measured by LBC (Low Background Counter). Analysis of ^{137}Cs , ^{226}Ra and ^{40}K in rain fall was obtained sample to be high concentration, and measured by Gamma Spektrometer. The result showed that concentrations of gross α and gross β in rain fall at Jakarta, Serpong, Bukittinggi, Pontianak, Makassar and Kupang are not detectable or the value is lower than Minimum Detectable Concentration (MDC). The concentration of ^{137}Cs , ^{226}Ra and ^{40}K are not detectable or the value is lower than Minimum Detectable Concentration (MDC).

Key Words : gross α total, gross β , ^{40}K , ^{137}Cs and ^{226}Ra , rain fall

PENDAHULUAN

Semakin pesat perkembangan teknologi sekarang ini berbanding lurus dengan polutan yang dihasilkan. Polutan yang terdapat di atmosfer dapat tercuci oleh air hujan, termasuk polutan radioaktif, dan jatuh ke bumi sehingga konsentrasi polutan radioaktif tersebut dapat diamati dengan melakukan pemantauan radioaktivitas dalam air hujan. Sehubungan dengan hal tersebut, telah dilakukan pemantauan cemaran radioaktif lingkungan dari jatuhnya polutan radioaktif dalam air hujan dengan melakukan pengukuran konsentrasi α total, β total, Cs-137, Ra-226 dan K-40 dalam air hujan. Pemantauan polutan radioaktif dalam air hujan dilakukan dengan menampung air hujan secara langsung menggunakan corong yang ditampung dengan jerigen dan penyangga kotak

kayu di 6 lokasi yaitu Jakarta, Serpong, Bukittinggi, Pontianak, Makassar dan Kupang.

Radium-226 adalah anak luruh dari ^{238}U yang mempunyai waktu paro fisik 1602 tahun. Untuk melakukan analisis ^{226}Ra , sampel disungkup selama 4 minggu supaya terjadi kesetimbangan radioaktif antara ^{226}Ra dengan anak luruhnya ^{214}Bi yang memancarkan radiasi gamma pada energi 609,31 keV dengan kelimpahan 0,446. Apabila ^{226}Ra masuk kedalam tubuh manusia dengan konsentrasi yang cukup tinggi maka ^{226}Ra dapat menggantikan kalsium dalam struktur tulang. Dari ^{226}Ra yang masuk ke dalam tubuh sekitar 80% dikeluarkan dengan cepat dari tubuh dan hanya sekitar 20% yang diserap oleh tubuh. Radium pada tulang mempunyai waktu paro biologi selama 10.000 hari [2].

Kalium-40 sebagai pemancar radiasi gamma pada energi 1460,8 keV dengan kelimpahan 0,107 mempunyai waktu paro fisik $1,28 \times 10^9$ tahun. Penyebaran ^{40}K di lingkungan mengikuti penyebaran isotop stabilnya ^{39}K . Kandungan ^{40}K rata-rata dalam kerak bumi kira-kira 29 g/kg. Kadarnya di dalam tubuh manusia kira-kira 60 Bq/kg berat badan [3].

Caesium-137 mempunyai waktu paro fisik 30 tahun, memancarkan radiasi gamma pada energi 661,66 keV dengan kelimpahan 0,85. Radionuklida ini mudah larut dan mudah diserap oleh saluran pencernaan. Berdasarkan penggolongan radionuklida menurut toksisitas, ^{137}Cs termasuk dalam kategori radionuklida dengan toksisitas sedang. Di dalam tubuh, cesium memiliki sifat yang hampir sama dengan kalium serta mempunyai waktu paro biologi selama 110 hari [3].

Caesium yang masuk ke dalam tubuh diserap oleh saluran pencernaan dan didistribusikan merata keseluruh tubuh. Cesium 137 di dalam tubuh sebagian besar (80%) mengendap pada otot dan hanya sebagian kecil (8%) mengendap pada tulang [2].

Tujuan pemantauan polutan radioaktif dalam air hujan adalah untuk mendapatkan data tentang jumlah polutan radioaktif yang terdapat dalam air hujan dan digunakan sebagai data dasar lingkungan yang berguna untuk pencegahan, penanggulangan pencemaran dan atau kerusakan

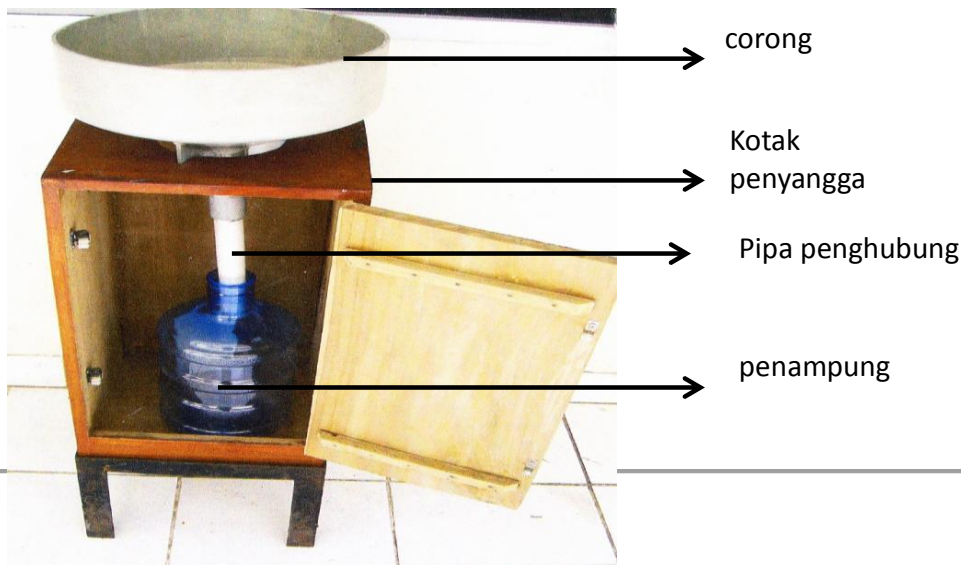
lingkungan diakibatkan jatuhnya radioaktif di Indonesia.

METODE

Pemantauan polutan radioaktif dalam air hujan dilakukan dengan menampung air hujan secara langsung menggunakan corong yang ditampung dengan jerigen dan penyangga kotak kayu di 6 lokasi yaitu Jakarta, Serpong, Bukittinggi, Pontianak, Makassar dan Kupang. Setelah penampungan, sampel dikirim ke laboratorium Keselamatan Lingkungan, PTKMR-BATAN, selanjutnya sampel dianalisis dengan metoda penguapan dimana gross alpa dan gross beta diukur dengan alat Low Bagroud Counter, sedangkan Cs-137, Ra-226 dan K-40 diukur dengan Spektrometer gamma

Pengambilan sampel

Sampel air hujan ditampung secara langsung menggunakan corong yang ditampung dengan jerigen dan penyangga kotak kayu yang berlokasi di Jakarta, Serpong, Bukittinggi, Pontianak, Makassar dan Kupang. Penampungan sampel air hujan di Jakarta, Serpong dilakukan setiap 1 (satu) bulan. Sedangkan di Bukittinggi, Pontianak, Makassar dan Kupang dilakukan penampungan setiap 3 (tiga) bulan. Pemantauan cemaran polutan radioaktif ini dilakukan selama tahun 2016.



Gambar 1. Kotak kayu penampungan sampel air hujan

Analisis dan pengukuran alpa dan beta

Sampel air hujan diuapkan sejumlah/volume 1000 ml dalam gelas beker menggunakan hot plate, hingga menjadi ± 5 ml. Larutan endapan ini dipindahkan kedalam planset dan diuapkan kembali dibawah lampu infra merah hingga kering. Selanjutnya endapan kering dalam planset dimasukkan kedalam desikator dan siap diukur dengan alat LBC (Low Background Counter) MPC-9400.

Analisis dan pengukuran Cs-137, Ra-226 dan K-40

Sampel air hujan yang diperoleh dari hasil penampungan diuapkan hingga 1000 ml dalam gelas beker menggunakan hot plate, dicatat volume total air hujan yang diuapkan. Sampel dipindahkan kedalam tabung tabung marinelli 1000 ml. Tabung Marinelli dtutup dan dilem dengan Araldit. Sampel air hujan siap diukur dengan alat spektrometer gamma

Perhitungan.

Konsentrasi alpa dan beta total dalam air hujan dihitung menggunakan persamaan

$$\text{Konsentrasi : } \frac{(C_s - C_b) / t \pm \sqrt{(C_s - C_b) / t}}{60 \times E \times V} \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan :

- Cs : cacah sampel
- Cb : cacah latar
- t : waktu cacah (detik)
- E : Effisiensi (%)

V : Volume (l)

Konsentrasi terendah yang dapat dideteksi (minimum detectable concentration) yang disingkat dengan MDC (Bq/l) yang dinyatakan dalam persamaan

$$\text{MDC} = \frac{2,33 \times (C_b / t_b)^{1/2}}{60 \times E \times V} \dots\dots\dots(2)$$

Keterangan :

- Cb : cacah latar
- Tb : waktu cacah background (detik)
- E : Effisiensi (%)
- V : Volume (l)

$$\text{MDC} \leq 2,33 \frac{\sqrt{n_B}}{\epsilon_\gamma \cdot P_\gamma \cdot w_{Sp}} \dots\dots\dots(4)$$

dengan:

- MDC : konsentrasi minimum terdeteksi (Bq/kg)
- n_B : laju cacah latar (cps)
- t_B : waktu cacah latar (detik)
- ε_γ : adalah efisiensi pada energi gamma teramati (%)
- P_γ : adalah yield dari energi gamma teramati (%)
- w_{Sp} : volume sampel (l)

Konsentrasi ⁴⁰K, ¹³⁷Cs, dan ²²⁶Ra dalam air hujan dihitung menggunakan persamaan :

$$C_{avg} = \frac{n_s - n_B}{\epsilon_\gamma \cdot P_\gamma \cdot w_{Sp}} \dots\dots\dots(3)$$

dengan :

- n_s : adalah laju cacah sampel (cps)
- n_B : adalah laju cacah latar (cps)
- ε_γ : adalah efisiensi pada energi gamma teramati (%)
- P_γ : adalah yield dari energi gamma teramati (%)
- w_{Sp} : adalah volume sampel (l)

Konsentrasi minimum yang dapat dideteksi (MDC) untuk suatu sistem spektrometer gamma dipengaruhi oleh efisiensi pencacahan, cacah latar dan berat sampel. Untuk menghitung MDC dengan tingkat kepercayaan 68% ditentukan dengan persamaan berikut.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Alpha total dan Beta total

Hasil analisis dan pengukuran α dan β total dalam sampel air hujan untuk periode Januari - Desember Tahun 2016 tercantum dalam Tabel 1 sebagai berikut:

Tabel 1. Hasil analisis dan pengukuran α dan β total untuk periode Januari 2016 - Desember 2016

Penyiapan sampel		Hasil Pengukuran			Hasil Evaluasi			
Kode	Vol.(L)	Parameter		Waktu (detik)	Ativitas (Bq/L)		MDC (Bq/L)	
		α	β		α	β	α	β
Jakarta 1/16	1,00	4.8	49.2	3600	<0.0057	<0.0119	0.0057	0.0119
Jakarta 2/16	1,00	9.0	55.8	3600	0.0071	<0.0119	0.0057	0.0119
Jakarta 3/16	1,00	9	90	3600	<0.0057	0.0329	0.0057	0.0119
Jakarta 4/16	1,00	6	67.2	3600	0.0060	0.0158	0.0057	0.0119
Jakarta 5/16	1,00	9	85.8	3600	<0.0057	0.0297	0.0057	0.0119
Jakarta 6/16	1,00	7.80	598.80	3600	<0.0057	0.4135	0.0057	0.0119
Jakarta 7/16	1,00	10.20	61.20	3600	<0.0057	<0.0119	0.0057	0.0119
Jakarta 8/16	1,00	10.20	78.00	3600	<0.0057	0.0239	0.0057	0.0119
Jakarta 9/16	1.00	13.8	52.8	3600	0.0060	0.0690	0.0057	0.0121
Jakarta 10/16	1.00	15	130.2	3600	0.0071	0.0631	0.0057	0.0119
Jakarta 11/16	1.00	7.2	49.2	3600	<0.0057	<0.0119	0.0057	0.0119
Jakarta 12/16	1,00	16.2	237	3600	<0.0057	0.0275	0.0055	0.0122
Serpong 1/16	1,00	15	312	3600	0.0071	0.1999	0.0057	0.0119
Serpong 2/16	1,00	7.2	76.8	3600	<0.0057	0.0230	0.0057	0.0119
Serpong 3/16	1,00	10.2	58.2	3600	<0.0057	<0.0119	0.0057	0.0119
Serpong 4/16	1,00	6	121.98	3600	<0.0057	0.0570	0.0057	0.0119
Serpong 5/16	1,00	10.8	366	3600	<0.0057	0.2406	0.0057	0.0119
Serpong 6/16	1,00	7.20	70.20	3600	<0.0057	0.0180	0.0057	0.0119
Serpong 7/16	1,00	7.50	129.30	3600	<0.0057	0.0624	0.0057	0.0119
Serpong 8/16	1,00	12.00	64.20	3600	<0.0057	0.0135	0.0057	0.0119
Serpong 9/16	1.00	13.2	70.8	3600	<0.0057	0.0185	0.0057	0.0119
Serpong 10/16	1.00	12	72	3600	<0.0057	0.0194	0.0057	0.0119
Serpong 11/16	1.00	7.2	55.20	3600	<0.0057	0.0067	0.0057	0.0119
Serpong 12/16	1,00	6	106.8	3600	0.0000	0.0261	0.0057	0.0119
B.Tinggi 3/16	1,00	7.2	61.2	3600	<0.0057	<0.0119	0.0057	0.0119
B.Tinggi 6/16	1,00	12.00	88.80	3600	<0.0057	0.0320	0.0057	0.0119
B.Tinggi 9/16	1.00	7.2	76.8	3600	<0.0057	0.0230	0.0057	0.0119
B.Tinggi 12/16	1,00	3	45	3600	<0.0057	<0.0119	0.0057	0.0119
Pontianak 3/16	1,00	9.00	43.80	3600	<0.0057	<0.0119	0.0057	0.0119
Pontianak 6/16	1,00	6.00	31.80	3600	<0.0057	<0.0119	0.0057	0.0119
Pontianak 9/16	1.00	7.2	33	3600	<0.0056	<0.0121	0.0056	0.0121
Pontianak 12/16	1,00	7.2	46.8	3600	<0.0057	<0.0119	0.0057	0.0119
Makassar 3/16	1,00	10.20	43.80	3600	<0.0057	<0.0119	0.0057	0.0119
Makassar 6/16	1,00	6.00	88.80	3600	<0.0057	0.0320	0.0057	0.0119
Makassar 9/16	1.00	4.2	37.8	3600	<0.0056	<0.0350	0.0056	0.0350
Makassar 12/16	-	-	-	-	-	-	-	-
Kupang 3/16	-	-	-	-	-	-	-	-
Kupang 6/16	1,40	16.20	200.40	3600	<0.0828	<0.0085	0.0828	0.0085
Kupang 9/16	1.00	4,2	253,2	3600	<0.0084	0.2422	0.0084	0.0185
Kupang 12/16	1,00	6	61.2	3600	<0.0057	<0.0119	0.0057	0.0119

Ket : -

= sampel kering (tdk datang)

Hasil analisis dan pengukuran α dan β total dalam sampel air hujan di Jakarta, Serpong, Bukittinggi, Pontianak, Makassar dan Kupang selama Januari - Desember 2016 secara umum menunjukkan tidak terdeteksi atau masih dibawah nilai (MDC) Alat Low Background Counter. Sedangkan nilai yang yang diatas nilai MDC seperti Jakarta Juni 2016, kemungkinan disebabkan noise alat.

Analisis Cs-137, Ra-226 dan K-40

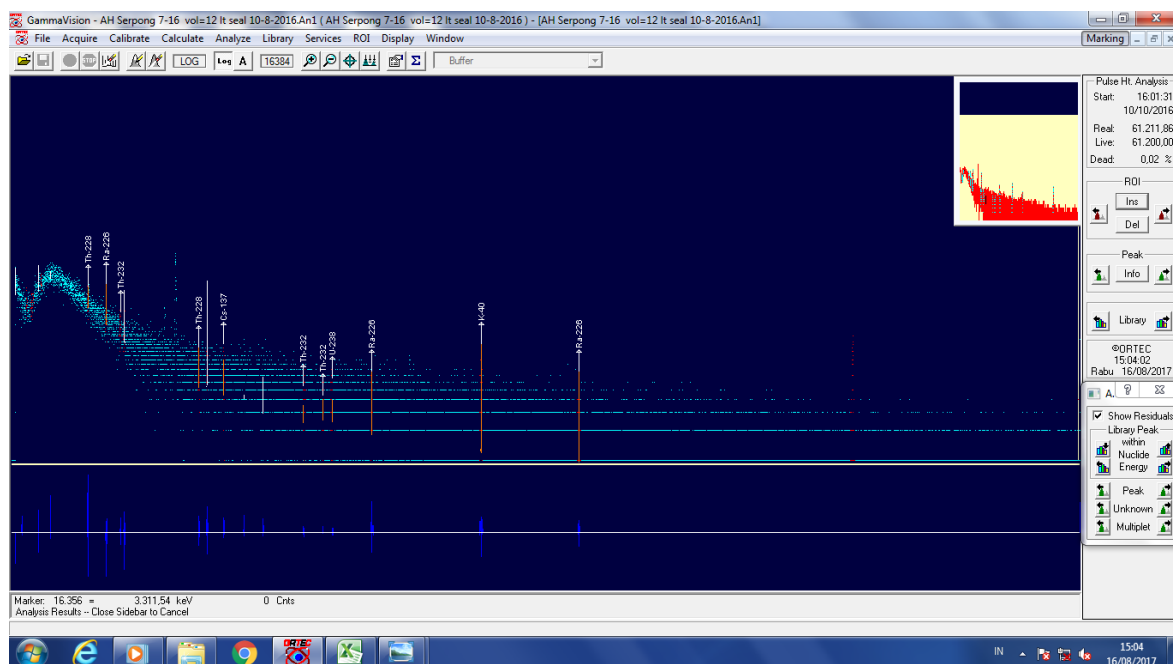
Hasil analisis dan pengukuran ^{137}Cs , ^{226}Ra dan ^{40}K dalam sampel air hujan selama Januari - Desember 2016 tercantum dalam Tabel 2. sebagai berikut :

Tabel 2. Hasil analisis dan pengukuran ^{137}Cs , ^{226}Ra dan ^{40}K dalam Air hujan untuk periode Januari - Desember 2016.

Penyiapan sampel		Waktu (detik)	Hasil Evaluasi					
Kode	Vol. (L)		Aktivitas (Bq/L)			MDC (Bq/L)		
			^{137}Cs	^{226}Ra	^{40}K	^{137}Cs	^{226}Ra	^{40}K
Jakarta 1/16	10.20	61200	<0.0008	<0.0039	0.0943	0.0008	0.0039	0.0099
Jakarta 2/16	16.25	61200	<0.0005	<0.0025	0.0114	0.0005	0.0025	0.0062
Jakarta 3/16	7.30	61200	<0.0000	<0.0100	<0.0100	0.0000	0.0100	0.0100
Jakarta 4/16	21.00	61200	<0.0004	<0.0019	0.0845	0.0004	0.0019	0.0048
Jakarta 5/16	20.80	61200	<0.0004	<0.0019	0.0302	0.0004	0.0019	0.0048
Jakarta 6/16	19.60	61200	<0.0006	<0.0028	0.1485	0.0006	0.0028	0.0071
Jakarta 7/16	20.50	61200	<0.0005	<0.0025	<0.0062	0.0005	0.0025	0.0062
Jakarta 8/16	15.80	61200	<0.0005	<0.0025	<0.0064	0.0005	0.0025	0.0064
Jakarta 9/16	21.20	61200	0.0000	0.0000	0.0500	0.0000	0.0000	0.0000
Jakarta 10/16	18.10	61200	0.0000	<0.0000	0.0200	0.0000	0.0000	0.0100
Jakarta 11/16	20.00	61200	<0.0000	<0.0000	<0.0100	0.0000	0.0000	0.0100
Jakarta 12/16	6.90	61200	<0.0000	<0.0100	<0.0200	0.0000	0.0100	0.0200
Serpong 1/16	15.00	61200	<0.0000	<0.0000	<0.0100	0.0000	0.0000	0.0100
Serpong 2/16	19.00	61200	<0.0000	<0.0100	<0.0100	0.0000	0.0000	0.0100
Serpong 3/16	17.25	61200	0.0000	<0.0000	<0.0100	0.0000	0.0000	0.0100
Serpong 4/16	18.00	61200	<0.0005	<0.0022	0.0123	0.0005	0.0022	0.0056
Serpong 5/16	15.50	61200	<0.0000	<0.0000	<0.0100	0.0000	0.0000	0.0100
Serpong 6/16	10.70	61200	<0.0010	<0.0048	0.0119	0.0010	0.0048	0.0119
Serpong 7/16	12.00	61200	<0.0009	<0.0042	<0.0106	0.0009	0.0042	0.0106
Serpong 8/16	20.00	61200	<0.0005	<0.0026	<0.0063	0.0005	0.0026	0.0063
Serpong 9/16	15.40	61200	<0.0000	<0.0000	<0.0000	0.0000	0.00005	0.0100
Serpong 10/16	15.00	61200	<0.0000	<0.0000	<0.0000	0.0000	0.00005	0.0100
Serpong 11/16	13.42	61200	0.0000	<0.000039	<0.0100	0.0000	0.0000	0.0100
Serpong 12/16	3.00	61200	<0.0000	<0.0100	<0.0300	0.0000	0.0100	0.0300
Bukittinggi 3/16	3.30	61200	<0.0000	<0.0100	<0.0300	0.0000	0.0100	0.0300
Bukittinggi 6/16	3.50	61200	<0.0024	<0.0115	0.4121	0.0024	0.0115	0.0289
Bukittinggi 9/16	3.20	61200	<0.0000	<0.0100	<0.0300	0.0000	0.0100	0.0300
Bukittinggi 12/16	4.00	61200	<0.0000	<0.0100	0.2600	0.0000	0.0100	0.0300
Pontianak 3/16	3.50	61200	<0.0000	<0.0100	<0.0300	0.0000	0.0100	0.0300
Pontianak 6/16	6.00	61200	<0.0018	<0.0085	<0.0212	0.0018	0.0054	0.0212
Pontianak 9/16	6.80	61200	<0.0000	<0.0100	<0.0200	0.0000	0.0100	0.0200
Pontianak 12/16	28.90	61200	0.0000	<0.0000	<0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Makassar 3/16	3.70	61200	<0.0000	<0.0100	<0.0300	0.0000	0.0100	0.0300

Makassar 6/16	3.50	61200	<0.0024	<0.0115	<0.0024	0.0024	0.0115	0.0024
Makassar 9/16	3.30	61200	<0.0000	<0.0100	<0.0300	0.0000	0.0100	0.0300
Makassar 12/16	-	-	-	-	-	-	-	-
Kupang 3/16	0.90	61200	<0.0100	<0.0500	<0.1200	0.0100	0.0500	0.1200
Kupang 6/16	1.40	62100	<0.0062	<0.0062	0.6076	0.0062	0.0290	0.0723
Kupang 9/16	0.66	62100	<0.0169	<0.0780	0.2620	0.0169	0.0780	0.1932
Kupang 12/16	1.00	61200	<0.0100	<0.0400	<0.1000	0.0100	0.0400	0.1000

Ket : - = sampel kering (tdk datang)



Gambar 2. Gambar Spektrum hasil pengukuran ¹³⁷Cs, ²²⁶Ra dan ⁴⁰K dalam sampel air hujan Serpong 7/16.

Hasil analisis dan pengukuran ¹³⁷Cs, ²²⁶Ra dan ⁴⁰K dalam sampel air hujan selama tahun 2016 secara umum menunjukkan bahwa konsentrasi ¹³⁷Cs, ²²⁶Ra dan ⁴⁰K dalam sampel air hujan di bawah nilai MDC Alat Spektrometer Gamma. Sedangkan nilai yang diperoleh diatas nilai MDC seperti Kupang Juni 2016, diperoleh nilai konsentrasi K-40 sebesar **0.6076**Bq/liter melebihi MDCnya yaitu 0,0723. Nilai ini bila dibandingkan dengan nilai rata-rata Kalium dalam tubuh manusia yaitu 60 Bq/kg berat badan [3].

Hasil yang diperoleh ini sama dengan hasil yang diperoleh pada pemantauan radioaktivitas lingkungan dalam air hujan periode tahun 2014 yaitu sama sama dibawah nilai MDC alat yang ukur yang digunakan [4].

Bila dibandingkan dengan PERKA BAPETEN No.07/2013 tentang Nilai batas Radioaktivitas Lingkungan seperti tertera dalam Tabel 3. maka hasil yang diperoleh dalam pemantauan polutan radioaktif (¹³⁷Cs, ²²⁶Ra dan ⁴⁰K) dalam air hujan di Jakarta, Serpong, Bukittinggi, Pontianak, Makassar dan Kupang pada tahun 2016 masih dibawah Nilai batas radioaktivitas lingkungan yang diizinkan.

Tabel 3. Nilai Batas Radioaktivitas Lingkungan (PERKA BAPETEN NO. 7/2013)

No.	Radionuklida	Baku tingkat radioaktivitas di air (Bq/m ³)
1.	Cs-137	2.5 x 10 ²
2.	Ra-226	1.0 x 10 ³

Hasil ini menunjukkan bahwa jatuhnya radioaktif tidak terdeteksi dalam air hujan selama tahun 2016. Dengan demikian radioaktivitas lingkungan dalam air hujan sepanjang tahun 2016 di Jakarta, Serpong, Bukittinggi, Pontianak, Makassar dan Kupang "bersih" dari kontaminasi jatuhnya polutan radioaktif. Nilai ini dapat digunakan sebagai data dasar radioaktivitas lingkungan dalam air hujan yang berguna untuk pencegahan, penanggulangan pencemaran dan atau kerusakan lingkungan yang diakibatkan radioaktif di Indonesia

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pemantauan Polutan Radioaktif dalam air hujan selama tahun 2016 dapat disimpulkan sebagai berikut :Konsentrasi α dan β total, Cs-137, Ra-226 dan K-40 dalam sampel air hujan di Jakarta, Serpong, Bukittinggi, Pontianak, Makassar dan Kupang tidak terdeteksi. Hasil pengukuran yang diperoleh dari pemantauan radioaktivitas (^{137}Cs , dan ^{226}Ra) masih dibawah kadar tertinggi yang diizinkan berdasarkan PERKA BAPETEN no. 7 Tahun 2013 tentang Nilai Batas Radioaktivitas Lingkungan. Hasil yang diperoleh ini secara umum menunjukkan bahwa jatuhnya radioaktif tidak terdeteksi dalam air hujan selama tahun 2016. Dengan demikian radioaktivitas lingkungan dalam air hujan sepanjang tahun 2016 "bersih" dari kontaminasi jatuhnya polutan radioaktif. Nilai ini dapat digunakan sebagai data dasar radioaktivitas lingkungan dalam air hujan yang berguna untuk pencegahan, penanggulangan pencemaran dan atau kerusakan lingkungan yang diakibatkan jatuhnya radioaktif di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

1. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *The Environmental Behavior of Radium*, Technical Reports Series No. 310, Vo. 2, IAEA, Vienna, 1990.
2. AKHADI M, Dasar-dasar Proteksi Radiasi, Penerbit Rineka Cipta, Jakarta, 2000.
3. BADAN TENAGA NUKLIR NASIONAL, *Pemantauan Radioaktivitas Lingkungan di Propinsi Lampung, 1997/1998*, Puslitbang Keselamatan Radiasi dan Biomedika Nuklir, BATAN, Jakarta, 1999.
4. NIRWANI L dkk, Pemantauan Radioaktivitas Dalam Air Hujan Periode 2014, Prosiding Seminar Nasional Keselamatan Kesehatan dan Lingkungan dan Pengembangan Teknologi Nuklir, Jakarta, PTKMR-BATAN,

KEMENKES-RI, Departemen Fisika FMIPA-ITB dan FKM-Universitas Indonesia . Jakarta, 25 Agustus 2015

5. BAPETEN, Nilai Batas Radioaktivitas Lingkungan, PERKA BAPETEN No.07 tahun 2013, Jakarta, 2013

Tanya - Jawab

Pertanyaan 1.

Dari : Masnelki Lubis

Pertanyaan :

1. Mengapa Ra-226 dapat menggantikan calcium dalam tulang dan apa bahayanya

Jawaban :

1. Karena Radium (Ra-226) mempunyai sifat kimia yang hampir sama dengan kalsium dalam pertukaran tulang sehingga radium yang masuk ke dalam tubuh dapat menggantikan kalsium. Radium berbahaya karena bersifat radioaktif dan memancarkan radiasi alfa dan gamma, jika berlebihan dapat menyebabkan kanker tulang.

ASSESSMENT KELAYAKAN PENYIMPANAN SUMBER RADIOAKTIF DI PT. GUNANUSA UTAMA FABRICATORS CILEGON - BANTEN

Farida Tusafariah¹, Gloria Doloressa²

¹Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi-Badan Tenaga Nuklir Nasional

²Badan Pengawas Tenaga Nuklir

e-mail: f4rida_2@batan.go.id

ABSTRAK

ASSESSMENT KELAYAKAN PENYIMPANAN SUMBER RADIOAKTIF DI PT. GUNANUSA UTAMA FABRICATORS-CILEGON-BANTEN. Berdasarkan Undang-Undang Nomor 10 Tahun 1997 pada Pasal 16 dan pelaksanaannya melalui Peraturan Pemerintah Nomor 33 Tahun 2007 tentang Keselamatan Radiasi Pengion dan Keamanan Sumber Radioaktif, maka Pemegang izin, harus memperhatikan keselamatan, keamanan, dan ketenteraman, kesehatan pekerja dan anggota masyarakat. Untuk menjamin keselamatan dan keamanan perlu dilakukan verifikasi keselamatan dalam penggunaan peralatan radiografi dan pemenuhan dokumen dan upaya keamanan sumber radioaktif. Pada tanggal 22 Oktober 2014 di PT Gunanusa Utama Fabricators dilakukan verifikasi keselamatan dan keamanan sumber radioaktif. Verifikasi keselamatan dan keamanan sumber bertujuan untuk melakukan assessment kelayakan penyimpanan sumber berdasarkan Peraturan Kepala BAPETEN nomor 7 tahun 2007, dan nomor 7 tahun 2009. Hasil assessment diperoleh bahwa Perusahaan belum menetapkan program keamanan sumber, tetapi dalam pelaksanaannya, tempat penyimpanan sumber sudah membatasi akses masuk melalui dua pintu. Fasilitas penyimpanan sudah kuat sesuai standar, pintu tidak mudah dirusak dan dibuat tanpa jendela serta dilengkapi dengan kunci. Sumber disimpan di dalam boom-pit yang sudah dilengkapi kunci pada saat tidak digunakan. Hasil pengujian peralatan radiografi diperoleh nilai tertinggi paparan radiasi sebesar $1,052\mu\text{Sv}/\text{jam}$, maka dosis yang diterima oleh pekerja radiasi adalah $2,104\text{ mSv}/\text{tahun}$. Penerimaan dosis sebesar $2,104\text{ mSv}$ pada permukaan sumber, sedangkan pada jarak 1 meter paparan radiasi sama dengan nilai background. Hasil assessment masih memenuhi persyaratan keselamatan dalam penggunaan peralatan radiografi industri, namun penerapan persyaratan keamanan sumber radioaktif perlu lebih ditingkatkan.

Kata kunci: keamanan sumber, verifikasi keselamatan, radiografi

ABSTRACT

ASSESSMENT OF FEASIBILITY STORAGE OF RADIOACTIVE SOURCE AT PT.GUNANUSA UTAMA FABRICATORS-CILEGON-BANTEN. Based on Law No. 10 of 1997 on Article 16 and its implementation through Government Regulation No. 33/2007 concerning the Safety of Ionizing Radiation and Radioactive Sources Security, License Holders who have received nuclear power utilization permit shall pay attention to safety, security and security, workers' health and public. In order to ensure safety and security it is necessary to verify safety in the use of radiographic equipment and the fulfillment of documents and efforts to secure radioactive sources. On October 22, 2014 at PT Gunanusa Utama Fabricators, verification of safety and security of the source, by conducting a feasibility assessment of source storage based on Regulation chairman of BAPETEN number 7-2007 and number 7-2009. The Assessment results obtained that the Company has not set the source security program, but in its implementation, the source storage area has restricted access through the two doors. Storage facilities are strong according to the standard, the door is not easily damaged and made without windows and comes with a lock. The source is stored in bombs that have been locked when not in use. Radiographic equipment testing results obtained the highest value of radiation exposure of $1.052\mu\text{Sv} / \text{h}$, then the dose received by radiation workers is $2,104\text{ mSv}/\text{year}$. Acceptance dose of 2.104 mSv is on the surface of the source, while at a distance of 1 meter radiation exposure equal to the background value. The assessment results still meet the safety requirements in the use of industrial radiography equipment, but the application of radioactive source security requirement needs to be improved.

Keyword: source security, safety verification, radiography.

PENDAHULUAN

Berdasarkan Undang-Undang Nomor 10 Tahun 1997 tentang Ketenaganukliran, pada Pasal 16 dan pelaksanaannya melalui Peraturan Pemerintah Nomor 33 Tahun 2007 tentang Keselamatan Radiasi Pengion dan Keamanan Sumber Radioaktif, maka Pemegang izin sebagai

orang atau badan yang telah menerima izin pemanfaatan tenaga nuklir harus memperhatikan keselamatan, keamanan, dan ketenteraman, kesehatan pekerja dan anggota masyarakat, serta perlindungan terhadap lingkungan hidup. Untuk memenuhi ketentuan ini, maka Pemegang izin wajib melaksanakan pemantauan paparan radiasi dan/atau kontaminasi radioaktif di daerah kerja,

secara terus menerus, berkala dan/atau sewaktu-waktu sesuai dengan jenis sumber yang digunakan [1,2,3].

PT Gunanusa Utama Fabricators sebagai salah satu badan yang menerima izin pemanfaatan dalam kegiatannya dengan menggunakan peralatan radiografi yang meliputi zat radioaktif dan pembangkit radiasi pengion (sinar-x). Peralatan Radiografi Industri yang digunakan PT Gunanusa Utama Fabricators, sebagai salah satu peralatan untuk pemeriksaan struktur dan/atau kualitas bahan dengan metode uji tak rusak dengan zat radioaktif dan/atau pembangkit radiasi pengion. Dalam rangka menjamin keselamatan dan kewajiban pelaksanaan Pasal 16, harus dilakukan verifikasi keselamatan sesuai dengan Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 7 tahun 2009.

Verifikasi keselamatan dalam penggunaan peralatan radiografi menurut Pasal 42 (1) pada peraturan ini dilakukan melalui, pemantauan paparan radiasi; pemeriksaan kondisi peralatan radiografi dan peralatan penunjang; uji kebocoran zat radioaktif, untuk zat radioaktif; dan pemeriksaan fisik tabung dan kabel tegangan tinggi, untuk pembangkit radiasi pengion [4].

Pada tanggal 22 Oktober 2014 di PT Gunanusa Utama Fabricators telah dilakukan verifikasi keselamatan dan keamanan dengan melakukan assessment kelayakan penyimpanan sumber berdasarkan Peraturan Kepala BAPETEN nomor 7 tahun 2009 dan Peraturan Kepala BAPETEN nomor 7 tahun 2007. Kegiatan dilakukan dengan pemantauan radiasi di daerah kerja, untuk memastikan perlindungan terhadap pekerja radiasi, masyarakat dan lingkungan hidup, dan keamanan sumber pada saat peralatan tersebut disimpan [4.5].

POKOK BAHASAN

Pengujian Peralatan Radiografi.

Pengujian peralatan radiografi dilakukan melalui verifikasi keselamatan dengan melakukan pengujian peralatan radiografi industri, menurut Perka BAPETEN adalah:

1. Pemantauan paparan radiasi, pemantauan harus dilakukan sesuai prosedur yang ditetapkan oleh Pemegang Izin, dan pemantauan paparan radiasi di sekitar daerah kerja harus dilakukan oleh Petugas Proteksi Radiasi.
2. Pemeriksaan kondisi peralatan radiografi dan peralatan penunjang harus dilakukan sesuai rekomendasi pihak pabrikan.

3. Uji kebocoran zat radioaktif, untuk zat radioaktif.

Uji kebocoran ini harus dilakukan sekali dalam 6 (enam) bulan, pengambilan sampel uji kebocoran dapat dilakukan oleh Petugas Proteksi Radiasi, dan sampel uji kebocoran dievaluasi oleh laboratorium yang terakreditasi.

4. Pemeriksaan fisik tabung dan kabel tegangan tinggi untuk pembangkit radiasi pengion.

Dalam melakukan pemantauan radiasi sebagai tanggung jawab pemegang izin, tidak hanya dilakukan di daerah kerja, tetapi juga harus melakukan pemantauan dosis untuk pekerja yang menggunakan peralatan radiografi tersebut. Pemantauan dilakukan dengan menggunakan dosimeter perorangan yang dapat diperoleh melalui laboratorium yang sudah terakreditasi [4, 6].

Persyaratan Keamanan Sumber Radioaktif.

Keamanan Sumber Radioaktif adalah tindakan yang dilakukan untuk mencegah akses tidak sah, perusakan, kehilangan, pencurian, dan/atau pemindahan tidak sah sumber radioaktif. Dalam Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 6 Tahun 2015, setiap orang atau badan yang melaksanakan pemanfaatan sumber radioaktif wajib memiliki izin pemanfaatan tenaga nuklir dari Kepala BAPETEN dengan memenuhi persyaratan Keamanan Sumber Radioaktif dan persyaratan keselamatan radiasi. Persyaratan Keamanan Sumber Radioaktif dilakukan melalui pemenuhan dokumen Keamanan Sumber Radioaktif dan upaya Keamanan Sumber Radioaktif. Dokumen Keamanan Sumber Radioaktif terdiri dari tingkat keamanan A, tingkat keamanan B, dan tingkat keamanan C.

Dalam Perka nomor 6 Tahun 2015, Fasilitas dengan kegiatan sumber radioaktif untuk radiografi industri termasuk sumber radioaktif kategori 2 dan tingkat keamanan B. Sebagai upaya keamanan sumber radioaktif harus memenuhi fungsi pencegahan, deteksi, penundaan dan respon, hal ini merupakan tanggung jawab pemegang izin dan dilaksanakan oleh Petugas Keamanan Sumber Radioaktif, dan pelaksanaannya sebagai berikut [7].

1. Pemegang Izin harus membuat organisasi Keamanan Sumber Radioaktif, dan menunjuk Petugas Keamanan Sumber Radioaktif.
2. Petugas keamanan sumber dapat dirangkap oleh petugas proteksi radiasi atau kepala satuan pengamanan fasilitas dan telah

- mengikuti pelatihan Keamanan Sumber Radioaktif.
3. Melakukan inventarisasi sumber secara berkala.
 4. Fasilitas penyimpanan harus kuat sesuai standar, pintu tidak mudah dirusak dan dibuat tanpa jendela serta dilengkapi dengan kunci.
 5. Peralatan keamanan sumber paling sedikit meliputi, alarm dilengkapi sirene, handy talky, telepon terpasang tetap/atau telepon selular, dan *closed circuit television (CCTV)*. Melakukan kendali kunci dengan menetapkan 2 (dua) personil untuk menyimpan dan menggunakan masing-masing 1 (satu) kunci manual yang berbeda dan digunakan secara bersamaan saat membuka dan menutup fasilitas, dan mengubah kombinasi *Personal Identification Number (PIN)* atau sandi kunci elektronik secara berkala atau jika terdapat personil yang kewenangannya dihentikan dalam mengakses.

METODOLOGI

Assessment kelayakan penyimpanan sumber dilakukan berdasarkan Peraturan Kepala BAPETEN nomor 7 tahun 2007, dan melakukan verifikasi keselamatan dengan pengujian peralatan radiografi industri.

Peralatan yang digunakan

1. Surveimeter Inspector/30925
2. Sumber radiasi Ir- 192-Gamma Mat, dengan aktivitas 17,12 Ci pada 22 Oktober 2014.
3. Penggaris.

Pelaksanaan Pengukuran.

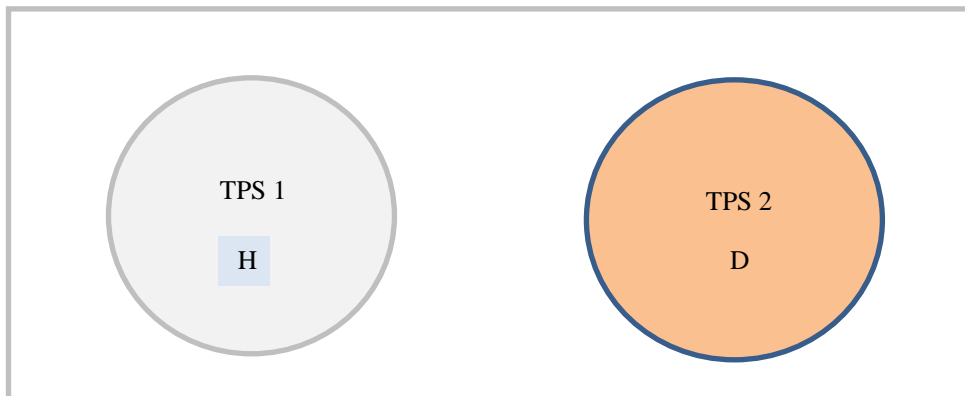
Pengukuran paparan radiasi di PT Gunanusa Utama Fabricators dilakukan pada daerah kerja tempat penyimpanan sumber (*Boom-Pit*) seperti pada Gambar. 1.



Gambar 1. Tempat Penyimpanan Sumber (*Boom-pit*)

Pemantauan daerah kerja pada umumnya dilakukan dengan mengukur paparan radiasi pada beberapa posisi: depan, samping kanan, belakang, samping kiri, dan atas. Pengukuran ini dilakukan pada permukaan sumber pada jarak 50 mm, dan pada jarak 1 meter. Pengukuran paparan

radiasi di tempat penyimpanan sumber, dilakukan pada saat Boom-pit berisi sumber radiasi (dan tanpa sumber radiasi) dengan menggunakan alat ukur radiasi inspector, pada titik yang sudah ditentukan. [8]. Titik pengukuran dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar. 2. Lokasi pengukuran pada tempat penyimpanan sumber (TPS)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam kegiatan assessment kelayakan penyimpanan sumber radioaktif, sebagai langkah dalam verifikasi keselamatan di PT Gunanusa Utama Fabricators, dilakukan pada tempat penyimpanan sumber (*Boom-Pit*). Alat ukur dan

sumber yang digunakan pada saat pengukuran ditampilkan dalam Gambar 3. Hasil pengukuran paparan radiasi di *Boom-pit* pada Tempat Penyimpanan Sumber 2 (TPS2) yang berisi sumber, dan Tempat Penyimpanan Sumber 1 (TPS1), tanpa sumber seperti pada Tabel 1.



Gambar 3. Surveimeter Inspector dan Sumber Ir-192 Gamma Mat.

Pada saat verifikasi keselamatan dilakukan, desain tempat penyimpanan sumber sudah memenuhi prinsip keselamatan dan proteksi radiasi yang meliputi justifikasi, limitasi dan optimasi. Hal ini ditunjukkan dengan:

1. Kegiatan yang dilakukan sangat bermanfaat bagi kelangsungan perusahaan, sementara risiko yang ada dapat dikendalikan dan diterima.
2. Limitasi dosis sudah diterapkan oleh perusahaan, dengan melakukan pemantauan dosis terhadap personil. Dari hasil pengukuran dosis yang diterima oleh pekerja radiasi adalah 2,104 mSv di lokasi tempat penyimpanan sumber, dan nilai ini masih jauh

dibawah Nilai Batas Dosis (NBD) yang ditetapkan oleh BAPETEN (20 mSv pertahun). Dosis yang diterima melalui pemantauan personal dosimeter juga masih di bawah NBD.

3. Optimasi sudah diterapkan antara lain dengan pembatasan dosis, dari hasil pengukuran untuk masyarakat tidak lebih dari 0,3 mSv pertahun, dan pembatasan dosis ini terdapat dalam program proteksi radiasi yang ada.

Secara umum fasilitas penyimpanan sumber sudah memenuhi persyaratan proteksi radiasi dalam penggunaan peralatan radiografi fasilitas tertutup seperti terlihat pada Gambar.1, dan Boom-Pit berada di dalamnya pada Gambar 4.



Gambar 4. Pengukuran paparan radiasi pada permukaan sumber Ir-192 (Boom-Pit)

Tabel 1. Hasil pengukuran Paparan Radiasi Tempat Penyimpanan Sumber (Boom- Pit) Sumber Ir-192- Gamma Mat

No.	Lokasi	H*(10) [$\mu\text{Sv/h}$]			H*(10) _{cor} [$\mu\text{Sv/h}$]	U _{exp} (%) CL=95%
		1	2	3		
	TPS2					
1	A	0.995	1.075	0.950	1.002	13
2	B	1.030	0.956	0.960	0.977	10
3	C	1.024	0.922	0.970	0.967	11
4	D	1.119	0.983	1.070	1.052	14
	TPS1					
5	E	0.782	0.825	0.876	0.824	12
6	F	0.856	0.889	0.969	0.900	14
7	G	0.823	0.768	0.756	0.778	10
8	H	0.741	0.835	0.779	0.781	13

Keterangan :

1. TPS1 : Tempat penyimpanan sumber (tanpa sumber)
2. TPS2 : Tempat penyimpanan sumber (ber isi sumber)

Dari Tabel 1. dapat dilihat bahwa nilai tertinggi paparan radiasi adalah pada lokasi D dengan paparan sebesar $1,052\mu\text{Sv/jam}$. Bila pekerja radiasi terus menerus selama 8 jam sehari, selama 5 hari, dalam 40 minggu, maka dosis yang diterima pada posisi ini adalah $1,052 \cdot 10^{-3} \text{mSv/jam} \times 2 \cdot 10^3 \text{jam} = 2,104 \text{ mSv}$. Penerimaan dosis sebesar 2,104 mSv akan terjadi apabila pekerja radiasi berada pada permukaan sumber seperti pada Gambar 4.

Hasil pengukuran pada jarak 1 meter paparan radiasi samadengan nilai *background*. Perkiraan dosis yang diterima setahun adalah $0,114 \cdot 10^{-3} \text{mSv/jam} \times 2 \cdot 10^3 \text{jam} = 0,228 \text{ mSv}$. Pengukuran yang dilakukan pada tempat penyimpanan sumber tanpa berisi sumber, nilai paparan tertingginya adalah $0,900 \mu\text{Sv/jam}$.

Dosis yang diterima pasti lebih kecil dari dosis pada pengukuran di tempat penyimpanan sumber yang berisi sumber radiasi. Oleh karena itu tempat penyimpanan sumber masih memenuhi persyaratan keselamatan.

Dari hasil pengukuran ini, bila pekerja radiasi bekerja selama delapan jam sehari di daerah tempat penyimpanan sumber, maka dosis yang diterima masih jauh di bawah Nilai Batas Dosis yang ditetapkan oleh BAPETEN (20 mSv pertahun). Hasil penerimaan dosis adalah dengan perhitungan selama delapan jam kerja setiap hari. Pada kenyataannya menurut informasi yang diterima dari Pengawas Keselamatan dan Kesehatan Kerja di lapangan, pekerja radiasi hanya bekerja sekitar 1 jam setiap harinya. Dengan demikian dosis yang diterima akan lebih

rendah lagi. Dari segi keselamatan radiasi masih memenuhi persyaratan keselamatan dalam penggunaan peralatan radiografi industri.

Beberapa persyaratan yang harus dipenuhi dalam penggunaan peralatan radiografi bila mengacu pada undang-undang nomor 10 tahun 1997, setiap kegiatan yang berkaitan dengan pemanfaatan tenaga nuklir wajib memperhatikan keselamatan, keamanan, dan ketentraman, kesehatan pekerja dan anggota masyarakat, serta perlindungan terhadap lingkungan hidup. Untuk mewujudkan hal ini kegiatan dalam penggunaan peralatan radiografi diharuskan mempunyai izin. Izin pemanfaatan dalam fasilitas ini harus mengacu pada PP No.29, dengan kegiatan termasuk kelompok A, dengan jenis radiografi industri fasilitas tertutup. Dengan memenuhi persyaratan yang diberikan oleh BAPETEN, kegiatan dapat dilaksanakan sesuai dengan izin yang telah diberikan. Persyaratan yang harus dipenuhi antara lain persyaratan administrasi dan persyaratan teknis.

Persyaratan administratif terdiri atas identitas pemohon izin, akta pendirian badan hukum atau badan usaha, serta persyaratan lain sesuai peraturan perundang-undangan. Persyaratan teknis terdiri dari prosedur operasi; spesifikasi teknis sumber; perlengkapan proteksi radiasi; peralatan keamanan sumber radioaktif; program proteksi dan keselamatan radiasi ; program keamanan sumber radioaktif; laporan verifikasi keselamatan radiasi dan/atau keamanan sumber radioaktif; hasil pemeriksaan kesehatan pekerja radiasi; serta kualifikasi personil dalam kegiatan tersebut.

Selain pemenuhan persyaratan izin, harus juga memenuhi persyaratan Keselamatan Radiasi dan Keamanan Sumber Radioaktif sesuai dengan Peraturan Pemerintah Nomor 33 tahun 2007. Penerapannya melalui Peraturan Kepala BAPETEN nomor 7 tahun 2009, nomor 4 tahun 2013, dan nomor 6 tahun 2015. Perka-Perka ini penerapannya melalui Persyaratan Keselamatan Radiasi yang meliputi persyaratan manajemen, persyaratan Proteksi Radiasi, persyaratan teknik, dan verifikasi keselamatan. Panduan dalam penerapannya dapat dilihat pada Program Proteksi dan Keselamatan Radiasi serta Dokumen Keamanan Sumber Radioaktif.

Ketersediaan Program dan Dokumen adalah menjadi tanggungjawab Pemegang Izin.

Hasil *assessment* menunjukkan bahwa Program Proteksi dan Keselamatan Radiasi sudah diterapkan pada perusahaan ini, namun perusahaan belum mempunyai dokumen keamanan sumber radioaktif. Dengan demikian berdasarkan obsevasi, hasil *assessment* bila mengacu pada keamanan sumber radioaktif, masih perlu ditingkatkan karena pada saat *assessment* dilakukan, perusahaan belum menetapkan program keamanan sumber berdasarkan Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 7 tahun 2007. Perusahaan ini belum menerapkan program keamanan sumber, tetapi dalam pelaksanaannya, tempat penyimpanan sumber sudah membatasi akses masuk melalui dua pintu. Fasilitas penyimpanan sudah kuat sesuai standar, pintu tidak mudah dirusak dan dibuat tanpa jendela serta dilengkapi dengan kunci. Sumber disimpan di dalam boom-pit yang sudah dilengkapi dengan kunci.

Pada saat ini persyaratan tentang keamanan sumber radioaktif sudah direvisi dengan Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 6 Tahun 2015, terdapat beberapa perbedaan persyaratan yang diberlakukan. Perbedaan tersebut misalnya upaya keamanan harus memenuhi berbagai fungsi, seperti fungsi pencegahan, fungsi deteksi, fungsi penundaan dan fungsi respon. Pada masing-masing fungsi ini diperlukan persyaratan termasuk peralatan yang dibutuhkan lebih dirinci, juga termasuk pemilihan untuk petugas keamanan sumbernya, serta inventarisasi sumber dilakukan secara berkala, tidak ditentukan setiap minggu.

Oleh karena itu sebagai upaya preventif dalam keamanan sumber radioaktif sebelum terbentuknya Program Keamanan Sumber Radioaktif, pada lokasi penyimpanan sumber diberlakukan kendali kunci. Kendali kunci dengan menetapkan 2 (dua) personil untuk menyimpan dan menggunakan masing-masing 1 (satu) kunci manual yang berbeda, dan digunakan secara bersamaan pada saat membuka dan menutup fasilitas, serta akan memasang CCTV.

KESIMPULAN

Hasil *assessment* kelayakan penyimpanan sumber radioaktif di tempat penyimpanan sumber (*boom-pit*), paparan radiasi di bawah nilai batas dosis yang ditetapkan, dan masih memenuhi persyaratan keselamatan dalam penggunaan peralatan radiografi industri. Pemegang izin harus menetapkan program keamanan sumber radioaktif sebagai pemenuhan Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 6 tahun 2015 sebagai pengganti Nomor 7 tahun 2007.

DAFTAR PUSTAKA

1. Undang-undang Nomor 10 Tahun 1997 tentang Ketenaganukliran, Sekretariat Negara, Jakarta, 1997
2. Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 33 tahun 2007, *Tentang Keselamatan Radiasi Pengion dan Keamanan Sumber Radioaktif*, Sekretariat Negara, Jakarta, 2007
3. Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 29 tahun 2008, *Tentang Perizinan Pemanfaatan Sumber Radiasi Pengion dan Bahan Bakar Nuklir*, Sekretariat Negara, Jakarta, 2008
4. BAPETEN, Peraturan Kepala Nomor 7 Tahun 2009 *tentang Keselamatan Radiasi dalam Penggunaan Peralatan Radiografi Industri*, Jakarta, 2009
5. -----, Peraturan Kepala Nomor 7 Tahun 2007 *tentang Keamanan Sumber Radioaktif*, Jakarta, 2007.
6. -----, Peraturan Kepala Nomor 4 Tahun 2013 *tentang Proteksi Radiasi dalam pemanfaatan Tenaga Nuklir*. Jakarta, 2013
7. -----, Peraturan Kepala Nomor 6 Tahun 2015 *tentang Keamanan Sumber Radioaktif*, Jakarta, 2015.
8. BATAN- PTKMR, SOP 001.003/OT 01 01/KMR.4.1, *Pengujian Tingkat Radiasi Gamma Daerah Kerja dan Benda Uji*, Jakarta, 2014.

KONSENTRASI RADIOAKTIVITAS LINGKUNGAN DALAM PARTIKULAT UDARA (*PM10*) DI KAWASAN NUKLIR PASAR JUMAT (KNPJ).

Leons Rixson, Megy Stefanus

Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi, jalan raya Cilandak no.49, Jakarta Selatan

leons@batan.go.id

ABSTRAK

KONSENTRASI RADIOAKTIVITAS LINGKUNGAN DALAM PARTIKULAT UDARA (*PM10*) DI KAWASAN NUKLIR PASAR JUMAT (KNPJ). Kajian radioaktivitas udara merupakan salah satu program pemantauan radioaktivitas lingkungan KNPJ. Partikulat Udara *PM10* ditangkap menggunakan kertas saring udara whatman EPM 2000. Konsentrasi massa *PM10* diukur dengan metode gravimetric. Sedangkan, radioaktivitas alfa-beta total menggunakan sistem pencacah *Low Background Counter* (LBC). Sampel dicuplik setiap tiga bulan sekali (triwulan) pada lima belas lokasi dalam periode Juni 2016 sampai dengan Juni 2017. Hasil menunjukkan koefisien korelasi cacahan alfa total terhadap beta total adalah 99.7%, hal ini mengindikasikan bahwa radiasi alfa-beta total adalah berasal dari peluruhan radionuklida alam (U-238 dan Th-232) konsentrasi massa rata-rata *PM10* pada periode triwulan 3 tahun 2016, triwulan 4 tahun 2017, triwulan 1 tahun 2017 dan triwulan 2 tahun 2017 berturut-turut adalah $124.42 \pm 14 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $116.70 \pm 12.80 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $132.13 \pm 13.54 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dan $187.25 \pm 13.54 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Perubahan konsentrasi radioaktivitas alfa-beta total yang dipengaruhi oleh variabel konsentrasi massa *PM10* berturut-turut sebesar 0.171 dan 0.165. Sementara itu, koefisien korelasi yang didapatkan dari hubungan *PM10* terhadap alfa-beta total adalah 41.47% dan 40.62 %.

Kata Kunci: Radioaktivitas, *Particulate Matter* (*PM10*), *Low Background Counter* (LBC)

ABSTRACT

PARTICULATE MATTER (PM10) ENVIRONMENTAL RADIOACTIVITY CONCENTRATION IN PASAR JUMAT NUCLEAR FACILITY (KNPJ). The study of air radioactivity is one of the KNPJ environmental radioactivity monitoring programs. Particulate Matter (PM10) was captured using whatman EPM 2000 air filter. Mass concentration of PM10 measured by gravimetric method. Meanwhile, total alfa-beta radioactivity using Low Background Counter counting system (LBC). Samples were sampled quarterly in fifteen locations in the period from June 2016 to June 2017. The results show coefficient correlations counts between gross alpha and gross beta is 96.5%, indicating that radiation gross alpha-beta is from the natural radionuclide decay (U-238 and Th-232). Average PM10 mass concentrations in third quarter / 2016, fourth quarter/2017, first quarter / 2017 and second quarter of 2017 were $124 \pm 14 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $113.61 \pm 12.80 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $132.13 \pm 13.54 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $187.25 \pm 14.09 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively. Radioactivity gross alfa-beta concentration is influenced by PM10 mass concentration variable of 0.171 and 0.165. Meanwhile, coefficient correlations between PM10 with alfa-beta total is 41.47% dan 40.62 %, respectively

Keywords: Radioactivity, *Particulate Matter* (*PM10*), *Low Background Counter* (LBC)

PENDAHULUAN

Pencemaran udara perkotaan pada saat ini merupakan masalah yang pelik dan cenderung semakin meningkat dari waktu ke waktu. Masalah utama pengendalian pencemaran lingkungan udara disebabkan karena pencemaran udara tidak mengenal batas administrasi wilayah. Pencemaran udara di suatu wilayah tidak hanya berasal dari sumber pencemar lokal namun dapat pula berasal dari perjalanan lintas provinsi maupun negara. *Particulate Matter* (*PM*) merupakan salah satu dari 12 parameter pencemar udara yang terdapat di dalam PP No 41 tahun 1999 [1]. *PM* memiliki dampak paling berbahaya bagi kesehatan manusia karena kemampuannya yang dapat masuk sampai ke sistem pernapasan yang paling dalam. *PM* didefinisikan sebagai subdivisi kecil dari material padat tersuspensi dalam gas atau cair. *PM* terjadi akibat emisi langsung ke udara yang disebut partikulat primer dan melalui bentukan sekunder di atmosfer yang berasal dari emisi gas sulfur dioksida, nitrogen oksida, ammonia, dan campuran organik volatile bukan metan yang dihasilkan dari aktivitas kegiatan manusia,

seperti pembangkit listrik, industri, transportasi dan proses alam [2]. *PM10* adalah partikel kasar yang memiliki diameter aerodinamik kurang dari 10 μm yang tersusun atas aluminosilikat dan oksida dari kerak, partikel debu jalan, pertanian, konstruksi, kejadian alam dan abu terbang hasil dari pembakaran bahan fosil seperti batu bara.

Konsentrasi massa *PM* ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) memiliki tingkat radioaktivitas yang berasal dari peluruhan radionuklida alam yang berada di dalam atmosfer. Partikel radionuklida yang melayang dipermukaan atmosfer berasal dari deret uranium (U-232), thorium (Th-232), actinium (U-235), dan K-40 yang mempunyai waktu paruh panjang. Hasil kajian di sekitar PLTU Rembang di Jawa Tengah menunjukkan bahwa identifikasi radionuklida di filter *PM10* adalah Th-234, Ra-226, Pb-212, Tl-208, Pb-214, K-40 hingga Bi-214 [3]. Radiasi yang dipancarkan oleh radionuklida alam tersebut sebagian besar adalah radiasi alfa dan beta. Deret radionuklida U-238 dan Th-232 melalui anak luruh radium Ra-226 dan Th-228 mengalami perubahan fase padat menjadi gas radon (Rn-222) dan thoron (Rn-220). Gas radon selanjutnya menghasilkan 4

(empat) buah elemen radionuklida dengan orde waktu yang sangat cepat berkisar milidetik sampai dengan 27 menit yang diantaranya adalah Pb-214 (26.8 menit), Bi-214 (19.9 menit). Seperti halnya radon, gas thoron menghasilkan anak luruh Pb-212 dan Bi-212 dengan orde waktu paruh 10.64 jam dan 60.55 menit.

Pengukuran Tingkat radioaktivitas udara merupakan bagian dari program pemantauan radioaktivitas lingkungan KNPJ yang bertujuan untuk mengetahui perubahan kualitas lingkungan yang mungkin terjadi akibat pencemaran hasil kegiatan penelitian di Kawasan Nuklir Pasar Jumat. Kajian radioaktivitas udara KNPJ tahun 2012 periode pemantauan bulan Juli s.d Desember 2012 menyatakan konsentrasi alfa-beta total tertinggi berturut-turut adalah $(8.280 \pm 2.390) \times 10^{-06}$ Bq/l dan $3.137 \times 10^{-05} \pm 4.841 \times 10^{-06}$ Bq/l [4]. Namun demikian, Kajian tersebut belum melakukan pengukuran konsentrasi massa *PM10* beserta tingkat radioaktivitas didalamnya. Tujuan dari makalah ini adalah untuk mengetahui sebaran konsentrasi massa *PM10* serta mengetahui kontribusi, korelasi dan rasio radioaktivitas alam yang terdapat dalam *PM10*.

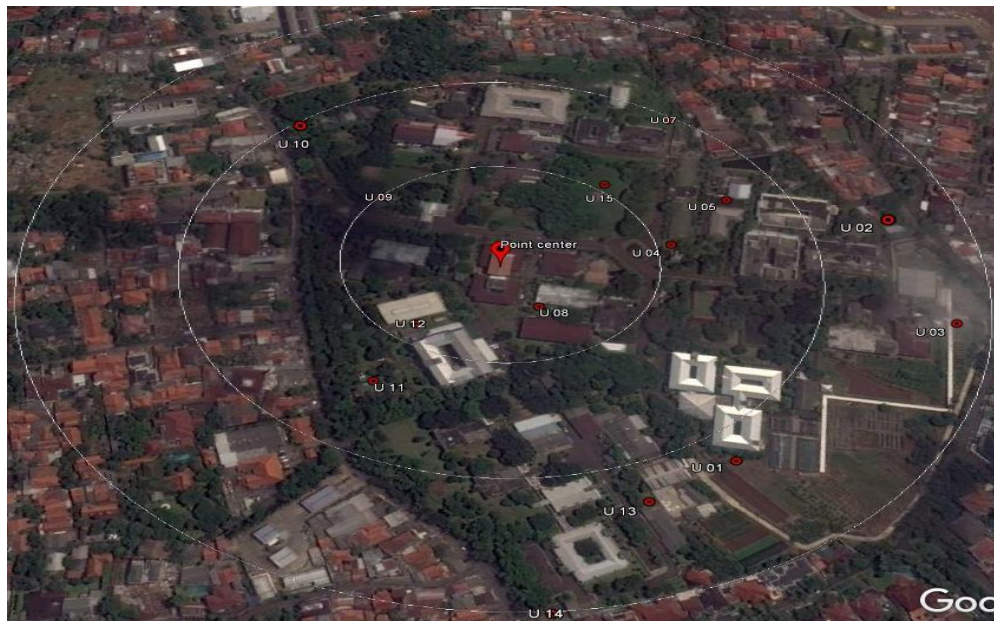
METODOLOGI

A. Lokasi dan Waktu

Pengambilan sampel debu udara seperti terlihat pada Gambar 1 dilakukan di 15 lokasi yang mengikuti pola lingkaran dalam radius 100, 200 dan 300 meter dengan Iradiator Karet Alam (IRKA) PAIR – BATAN sebagai titik pusatnya, berdasarkan dokumen Rencana Pengelolaan dan Pemantauan Lingkungan, PATIR-BATAN, Jakarta, 1993 [5]. Waktu pelaksanaan kegiatan pengambilan sampel dan analisa adalah dari bulan Juli 2016 sampai dengan Juni 2017.

B. Alat Dan Bahan

- Kertas Saring EPM 2000
- *Global Positioning System* (GPS)
- *descicator*
- *Air Sampler Radeco H-810 DC*
- *Tripod*
- Sistem pencacah *Low Background Counting* (LBC) *iMatic*
- Neraca analitik dengan ketelitian 4 digit



Gambar 1. Peta pemantauan pengambilan sampel *PM10*

C. Sampling dan Pengukuran

Partikulat udara ditangkap dengan kertas saring *whatman EPM 2000* yang terpasang pada alat pencuplik debu udara *radeco H-810 DC*. *EPM 2000* mempunyai spesifikasi besar ukuran pori 2.0 μm dengan diameter 47 mm. setelah pencuplikan kertas saring di ukur dengan LBC selama 60 menit untuk lalu dihitung radioaktivitas alfa-beta total melalui persamaan 1.

$$T_{ru} = \frac{(1/2)^{t/T_{1/2}} \times R_{sp} - R_{bg}}{\eta_f \times \eta_p \times V} \dots (1)$$

dengan:

- T_{ru} : Tingkat Radioaktivitas Udara (Bq/m³)
- t : selang waktu selesai *sampling* sampai saat mulai pancacah
- $T_{1/2}$: waktu paruh partikulat
- R_{sp} : Cacah sampel (CPS)
- R_{bg} : Cacah latar (CPS)
- η_f : Efisiensi kertas saring (98 %)
- η_p : Efisiensi sistem pencacah (%)
- V : Volume *sampling* (m³)

Waktu paruh partikulat didapatkan dengan mengukur laju cacah peluruhan setiap 1 menit di salah satu titik lokasi *sampling*. Efisiensi sistem cacah didapatkan dengan mengukur cacahan sumber standar alfa (Am-241) dan beta (Sr-90) terhadap aktivitasnya. Perhitungan efisiensi sistem pencacah ditunjukkan oleh persamaan 2.

$$T_{ru} = \frac{R_{st} - R_{bg}}{A_{st}} \dots\dots\dots (2)$$

dengan:

- T_{ru} : Tingkat Radioaktivitas Udara (Bq/m³)
- R_{sp} : Cacah sampel (CPS)
- R_{bg} : Cacah latar (CPS)

Selanjutnya kertas saring dikondisikan didalam *descicator* selama 24 jam dengan kelembaban ruangan adalah 40-60 % dan suhu 18-25⁰C [6]. Konsentrasi massa *PM10* diukur dengan metode gravimetri dan dihitung menggunakan persamaan 3.

$$PM10 = \frac{M_2 - M_1}{V} \dots\dots\dots(3)$$

dengan:

- $PM10$: Konsentrasi Massa *PM10* (μg/m³)
- M_1 : Massa filter sebelum pencuplikan (μg)
- M_2 : Massa filter setelah pencuplikan (μg)

D. Analisis Data

Data hasil pengukuran yang didapatkan adalah konsentrasi massa *PM10* dengan metode gravimetri dan radioaktivitas alfa-beta total yang diukur dengan sistem pencacah LBC. Data tersebut kemudian di analisis secara deskriptif dalam bentuk ringkasan statistik (*mean*, median, modus, standar deviasi, dll) serta di visualisasikan dalam bentuk grafik, tabel, histogram dan diagram *box plot*. Analisis uji statistik berupa analisis satu arah *ANOVA*, rasio, uji-t dan analisis regresi-korelasi menggunakan bantuan perangkat lunak SPSS.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Prakiraan radionuklida dalam alfa-beta total

Waktu paro ($T_{1/2}$) radioaktivitas alfa-beta total didefinisikan sebagai selang waktu yang dibutuhkan radionuklida pemancar radiasi alfa-beta untuk meluruh menjadi separuhnya. Sebuah penelitian di Jeddah, Arab Saudi menyatakan radionuklida pemancar radiasi alfa-beta didalam *PM2.5* diudara ambien berasal dari produk peluruhan uranium (U-238), thorium (Th-232) serta radionuklida non deret seperti kalium 40 (K-40) dengan rata-rata konsentrasi berturut-turut adalah 10.8 ± 3.4, 11.8 ± 4.2 dan 301.8 ± 76.1 Bq/kg [7]. Hasil pencacahan alfa beta total persatuan waktu pada Gambar 2 menunjukkan konstanta peluruhan alfa beta total berturut turut adalah 0.016 dan 0.017 sementara itu korelasi hubungan antara waktu peluruhan dengan cacahan mempunyai hubungan koefisien korelasi yang sangat erat sebesar 96.7% untuk alfa total dan 97.98% untuk beta total. Waktu paro ($T_{1/2}$) cacahan alfa-beta total didapatkan melalui persamaan 5.

$$T_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda} \dots\dots\dots (5)$$

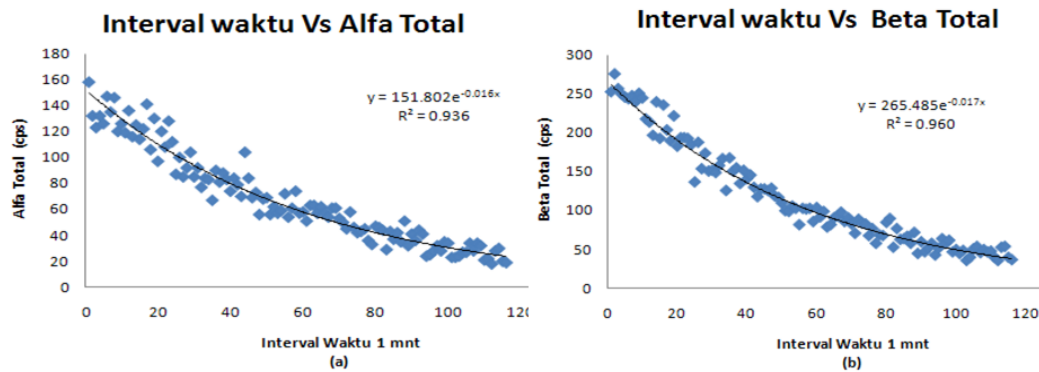
Melalui persamaan tersebut didapatkanlah nilai waktu paro untuk alfa total adalah 43.31 menit sedangkan untuk beta total adalah 40.76 menit. Pada Gambar 3 menunjukkan variasi perubahan cacahan beta total sangat dipengaruhi oleh cacahan alfa total dengan nilai 0.996, sedangkan koefisien korelasinya sebesar 99.7%. Ketiga grafik tersebut memberi dugaan bahwa radionuklida pemancar alfa-beta total berasal

dari deret peluruhan U-238 dan Th-232 hal ini didasarkan waktu paro yang pendek serta koefisien korelasi erat alfa-beta total yang tidak dimungkinkan berasal radionuklida alam K-40 yang memiliki waktu paro panjang dan tidak memancarkan radiasi alfa.

B. Radioaktivitas alfa-beta total

Hasil perhitungan deskriptif radioaktivitas rata-rata alfa-beta total untuk 4 periode pemantauan dihasilkan konsentrasi tertinggi terdapat di triwulan 2 tahun 2017 sebesar $0.86 \pm 0.03 \text{ Bq/m}^3$ untuk alfa total, sedangkan untuk beta total adalah $1.59 \pm$

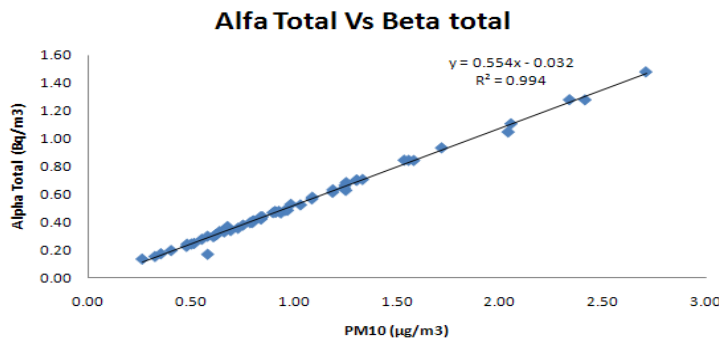
0.06 Bq/m^3 . Pada grafik boxplot yang ditunjukkan oleh Gambar 4 menunjukkan konsentrasi radioaktivitas alfa-beta total tertinggi adalah di triwulan 2 tahun 2017 dengan tingkat radioaktivitas berturut-turut sebesar $1.48 \pm 0.041 \text{ Bq/m}^3$ dan $2.71 \pm 0.085 \text{ Bq/m}^3$. Nilai radioaktivitas alfa total tertinggi tersebut tersebut tidak melebihi dari nilai baku tingkat radioaktivitas udara untuk Pb-210 sebagai anak luruh U-238 dan Bi-212 anak luruh dari Th-232 yang tertuang pada PERKA BAPETEN No.7 Tahun 2013 yang berturut-turut adalah sebesar 4.3×10^0 dan $3.8 \times 10^3 \text{ Bq/m}^3$ [8].



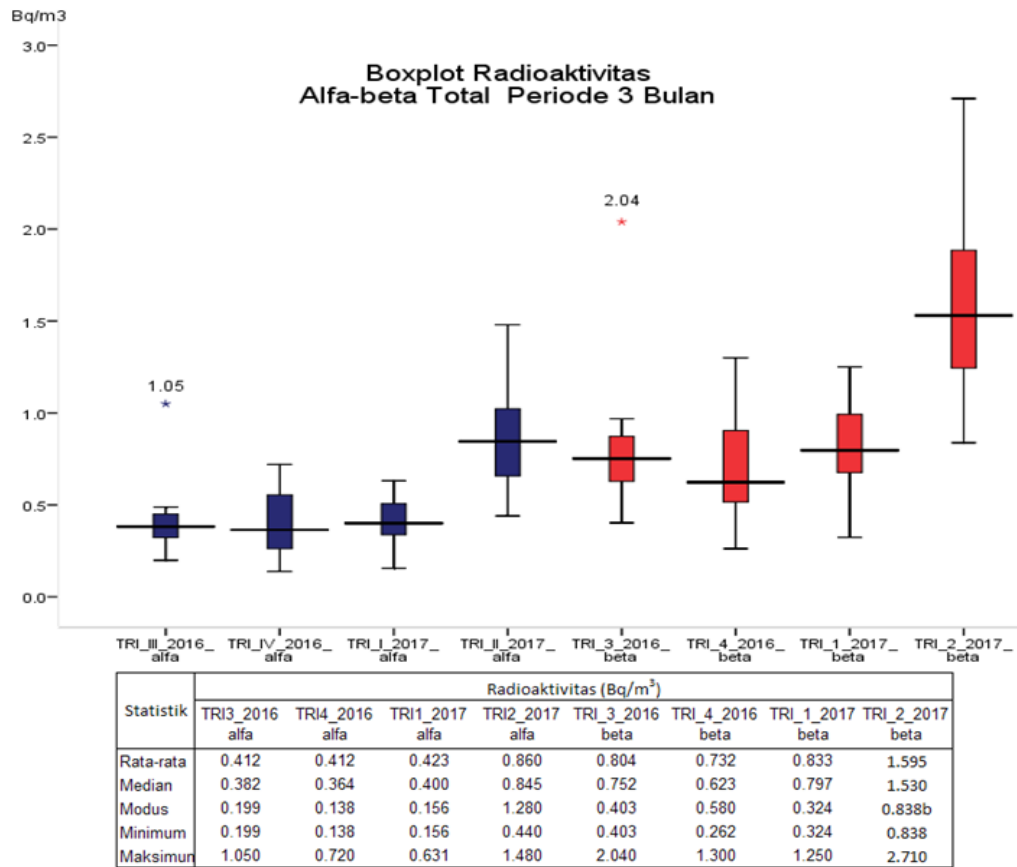
Gambar 2. (a) peluruhan cacahan alpha total, (b) Peluruhan cacahan beta total

Hasil uji *anova* ditunjukkan pada tabel 1 menyatakan bahwa ada perbedaan nyata konsentrasi rata-rata radioaktivitas alfa-beta total yang signifikan diantara ke-4 periode pemantauan. Perbedaan konsentrasi rata-rata tersebut ditunjukkan oleh tabel 2 melalui uji *Post Hoc Multiple Comparisons* dengan metode *Tukey statistic* yang menyatakan bahwa periode pemantauan triwulan 2 tahun 2017 berbeda secara signifikan dengan ke-3 periode pemantauan lainnya. Perbedaan konsentrasi partikulat udara dapat disebabkan oleh faktor meteorologi (curah hujan, arah dan kecepatan angin, kelembaban, intensitas

matahari, suhu, tekanan udara) dan aktivitas kegiatan disekitar lokasi pemantauan yang menghasilkan sumber pencemar. Pada Gambar 5 memberikan hasil distribusi frekuensi radioaktivitas alfa total selama 1 tahun periode pemantauan adalah 48.33 % pada kelas interval 0.25 s.d 0.5 Bq/m^3 , sedangkan, untuk beta total adalah 55% pada tingkat radioaktivitas 0.5 s.d 1.0 Bq/m^3 . Rasio perbandingan radioaktivitas alfa total terhadap beta total adalah sebesar 0.52 yang memberi pengertian konsentrasi radioaktivita beta total akan lebih tinggi $\pm 2 \text{ Bq/m}^3$ terhadap alfa total



Gambar 3. Korelasi hubungan alfa total dengan beta total.



Gambar 4. Grafik *boxplot* radioaktivitas alfa-beta total berdasarkan periode pemantauan

C. Konsentrasi Massa *PM10*

Grafik Konsentrasi massa *PM10* pada Gambar 6 menunjukkan range konsentrasi massa *PM10* adalah $16.67 \pm 11.80 \mu\text{g}/\text{m}^3 - 316.67 \pm 17.07 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Konsentrasi masa *PM10* setiap triwulan pemantauan adalah $124 \pm 14 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $113.61 \pm 12.80 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $132.13 \pm 13.54 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $187.25 \pm 14.09 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sedangkan konsentrasi rata-rata selama 1 tahun pemantauan adalah $135.56 \pm 64.55 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Konsentrasi *PM10* tertinggi melebihi dari nilai baku mutu udara ambien *PM10* [1] sebesar $150 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ terjadi pada periode pemantauan triwulan 3 tahun 2016 di lokasi pos jaga PPBGN yang berdekatan dengan jalan Lebak Bulus Raya. Konsentrasi massa tinggi pada lokasi tersebut diprediksi karena terdeposisinya partikulat-partikulat kasar yang berasal dari debu jalan dan tanah. Hal tersebut sesuai dengan studi yang dilakukan di Tangerang Selatan yang menyatakan bahwa sumber polutan *PM 10* berasal dari 5 faktor yaitu debu tanah (49.19%), transportasi (25.60%), campuran debu jalan dengan industri (19.04%), industri logam

(6.48%) dan campuran garam laut dengan biomassa (3. 67%) [9]

Pada Gambar 7 diperlihatkan hubungan antara konsentrasi massa *PM10* terhadap radioaktivitas alfa-beta total. Variasi perubahan alfa-beta total yang dipengaruhi oleh perubahan variabel konsentrasi massa menunjukkan trend positif dengan nilai berturut turut 0.172 dan 0.165, sedangkan nilai koefisien korelasi adalah kategori sedang sebesar 41.47% dan 40.62 %.

Tabel 1. Uji Anova radioaktivitas 4 periode pemantauan

ANOVA

gross_alpha_hylokasi					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	.631	14	.045	.455	.945
Within Groups	4.456	45	.099		
Total	5.087	59			

Gross_beta					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	7.703	3	2.568	15.779	.000
Within Groups	9.112	56	.163		
Total	16.815	59			

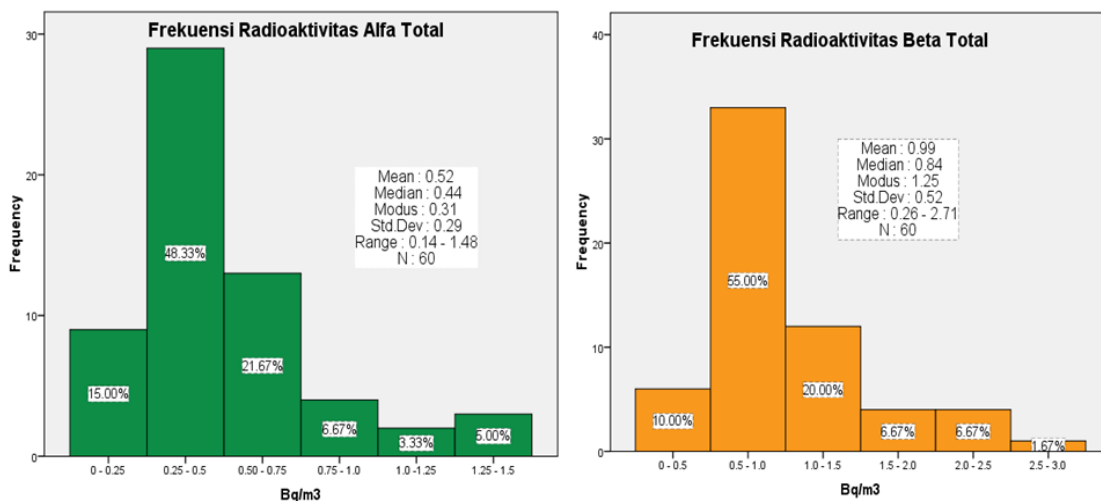
Tabel 2. Uji Post Hoc Multiple Comparisons

Dependent Variable: Gross_alpha

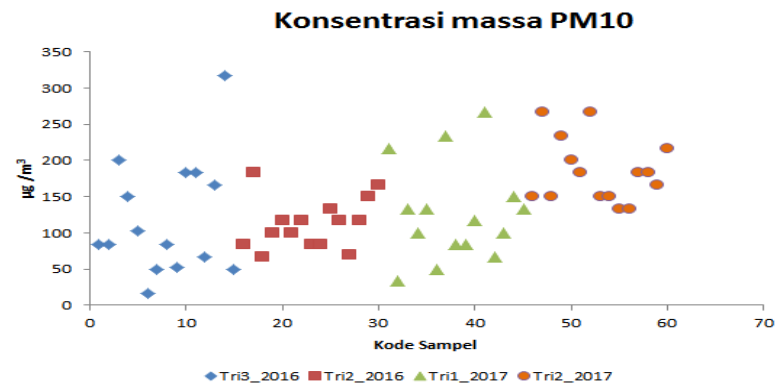
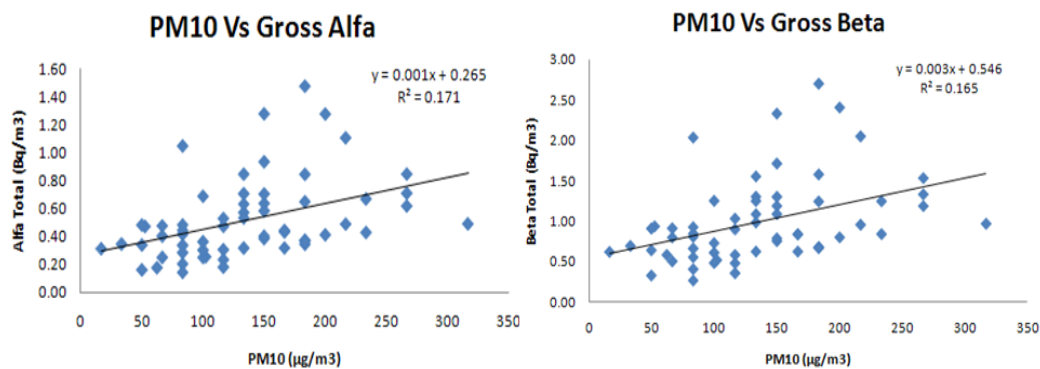
	(I) TRIWULAN	(J) TRIWULAN	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.
Tukey HSD	Tri2_2016	Tri3_2016	.04747	.07973	.933
		Tri1_2017	-.01100	.07973	.999
		Tri2_2017	-.44860 [*]	.07973	.000
	Tri3_2016	Tri2_2016	-.04747	.07973	.933
		Tri1_2017	-.05847	.07973	.883
		Tri2_2017	-.49607 [*]	.07973	.000
Tri1_2017	Tri2_2016	.01100	.07973	.999	
	Tri3_2016	.05847	.07973	.883	
	Tri2_2017	-.43760 [*]	.07973	.000	
Tri2_2017	Tri2_2016	.44860 [*]	.07973	.000	
	Tri3_2016	.49607 [*]	.07973	.000	
	Tri1_2017	.43760 [*]	.07973	.000	

Dependent Variable: Gross_beta

	(I) TRIWULAN	(J) TRIWULAN	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.
Tukey HSD	Tri2_2016	Tri3_2016	.11093	.14730	.875
		Tri1_2017	-.02907	.14730	.997
		Tri2_2017	-.79133 [*]	.14730	.000
	Tri3_2016	Tri2_2016	-.11093	.14730	.875
		Tri1_2017	-.14000	.14730	.778
		Tri2_2017	-.90227 [*]	.14730	.000
	Tri1_2017	Tri2_2016	.02907	.14730	.997
		Tri3_2016	.14000	.14730	.778
		Tri2_2017	-.76227 [*]	.14730	.000
	Tri2_2017	Tri2_2016	.79133 [*]	.14730	.000
		Tri3_2016	.90227 [*]	.14730	.000
		Tri1_2017	.76227 [*]	.14730	.000



Gambar 5. Distribusi Frekuensi radioaktivitas alfa-beta total 1 tahun pemantauan

Gambar 6. Konsentrasi massa PM_{10} Gambar 7. Grafik Korelasi konsentrasi mass PM_{10} terhadap radioaktivitas Alfa-beta total

KESIMPULAN

Kajian ini memberikan hasil cacahan alfa beta total diprediksi berasal dari radionuklida anak luruh U-238 dan Th-232 yang ditunjukkan dengan hubungan kuat radioaktivitas alfa total terhadap beta total dengan koefisien korelasi 99.7%. Uji anova menunjukkan terdapat perbedaan rata-rata radioaktivitas alfa-beta total periode triwulan 2 tahun 2017 terhadap ke-3 periode pemantauan lainnya. Rasio antara alfa-beta total dalam partikulat udara secara rata-rata adalah 0.52 yang memberi pengertian konsentrasi radioaktivita beta total akan lebih tinggi $\pm 2 \text{ Bq/m}^3$ terhadap alfa total

Konsentrasi massa tertinggi PM_{10} yang melebihi dari nilai baku mutunya diprediksi berasal dari debu jalan dan tanah, hal ini dikarenakan lokasi *sampling* yang dekat dengan Jalan Lebak Bulus Raya. Hubungan positif antara konsentrasi massa PM_{10} dengan konsentrasi alfa-beta total memiliki koefisien korelasi sedang sebesar 41.47% dan 40.62%.

SARAN

Bedasarkan hasil radioaktivitas alfa-beta total disarankan untuk melakukan analisa secara kualitatif untuk menentukan radionuklida yang terdapat didalam PM_{10} . Identifikasi unsur dalam PM_{10} sebaiknya dilakukan untuk menentukan faktor-faktor yang dapat menentukan prediksi asal partikulat eras

DAFTAR PUSTAKA

1. Peraturan Pemerintah nomor 41 tahun 1999. Pengendalian Pencemaran Udara Jakarta (ID), (1999).
2. Theakston F. *Health risks of particulate matter from long-range transboundary air pollution, joint WHO/Convention task Force on the health aspects of air pollution*. Denmark WHO, (2006)..
3. Sihono, Sutanto WW, dan Iswanto. Radioaktivitas $PM_{2.5}$ dan PM_{10} di lokasi PLTU Rembang. Prosiding Seminar Penelitian dan Pengelolaan Perangkat Nuklir Pusat Teknologi

- Akselerator dan Proses Bahan Yogyakarta. Yogyakarta. Indonesia, (2012)
4. Rixson L, Stefanus M. Pengukuran Radioaktivitas Alfa dan Beta Total Dalam Debu Udara di Sekitar Kawasan Nuklir Pasar Ju'mat. Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Fungsional Pengembangan Teknologi Nuklir VII. Jakarta. Indonesia, (2012)
 5. BADAN TENAGA NUKLIR NASIONAL, *Prosedur Analisis Sampel Radioaktivitas Lingkungan*, BATAN, Jakarta, (1998).
 6. Maenhaut W, Francois F, Cafmeyer J. The "Gent" Stacked Filter Unit (SFU) sampler for the collection of atmospheric aerosols in two size fractions: description and instructions for installation and use. Report No. NAHRES-19, International Atomic Energy Agency, Vienna. hal: 249-263, (1993).
 7. Zytoon MA, Aburas HM, Abdulsalam MI. *Determination of ^{40}K , ^{232}Th and ^{238}U activity concentrations in ambient $\text{PM}_{2.5}$ aerosols and the associated inhalation effective dose to the public in Jeddah City, Saudi Arabia*. Journal of Environmental Radioactivity. 129:148-156, (2014).
 8. Peraturan Kepala Badan pengawas tenaga Nuklir Nasional nomor 7 tahun 2013. Nilai Batas Radioaktivitas Lingkungan. Jakarta (ID), (2013).
 9. Rixson L, Riani E, Santoso M. Karakterisasi *Particulate Matter (PM)* dengan Teknik Analisis Nuklir dan Strategi Pengendaliannya Studi Kasus Kota Tangerang Selatan [Tesis]. Bogor (ID): Institut Pertanian Bogor Jakarta, (2015).

STUDY AWAL DETEKSI MIKRONUKLEI PADA LIMFOSIT PEKERJA RADIASI MEDIK

Yanti Lusiyanti¹, Masnelly Lubis¹, Suryadi¹, Sri Sardini¹, Viria AS¹, Siti Nurhayati¹

¹Pusat Teknologi dan Keselamatan Metrologi Radiasi

Badan Tenaga Nuklir Indonesia

k_lusiyanti@batan.go.id

ABSTRAK

STUDY AWAL DETEKSI MIKRONUKLEI PADA LIMFOSIT PEKERJA RADIASI MEDIK Pekerja radiasi medis berpotensi terpapar radiasi pengion dosis rendah. Paparan radiasi pengion dapat menginduksi terbentuknya mikronuklei. Mikronukleus (MN) adalah nukleus kecil yang merupakan materi nukleus (DNA) terbentuk dari fragmen asentrik kromosom yang gagal bergabung dengan sel anak selama proses pembelahan sel. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi perubahan struktur atau aberasi kromosom berdasarkan parameter mikronuklei pada pekerja radiasi medis yang terpapar radiasi pengion tingkat rendah. Sampel darah diambil dari 12 pekerja radiasi medis dengan rerata masa kerja $16,41 \pm 9,94$ tahun dan kelompok kontrol. Pengamatan mikronuklei diperoleh pada sel binukleat dengan menggunakan metode uji pengeblokan sitokinesis (CBMN-*assay*). Hasil penelitian menunjukkan frekuensi MN pada pekerja radiasi medik relatif lebih tinggi dibanding kelompok kontrol, namun tidak berbeda signifikan ($P = 0,67$). Hal ini menunjukkan bahwa paparan radiasi yang diterima pekerja tidak berdampak secara signifikan pada frekuensi mikronuklei.

Kata Kunci : Aberasi kromosom, micronuclei, limfosit, pekerja radiasi.

ABSTRACT

PRELIMINARY STUDY OF DETECTION OF MIKRONUKLEI IN LYMPHOCYTES OF MEDICAL RADIATION WORKERS Medical radiation workers are potentially exposed to low ionizing radiation doses. Exposure to ionizing radiation can induce the formation of micronuclei. Micronucleus (MN) is a small nucleus that is a nuclear material (DNA) formed from chromosomal acentric fragments that fail to join the daughter cells during cell division. The aim of this study is to evaluate changes in chromosomal structures or chromosomal aberrations based on micronuclei parameters in medical radiation workers exposed to low level ionizing radiation. Blood samples were taken from 12 medical radiation workers with mean duration workers of $16,41 \pm 9,94$ years old and control group. Observations of micronuclei were obtained in binucleic cells (BNC) using the cytokinesis block (CBMN) assay. The results showed that MN frequencies in medical radiation workers were relatively higher than the control group, but not significantly different ($P = 0.67$). These results suggest that radiation exposure received by workers does not have a significant impact on micronuclear frequencies

Key word: Chromosomal aberrations, micronuclei, human lymphocytes, cytogenetics, occupational Radiation.

PENDAHULUAN

Paparan radiasi yang diaplikasikan di setiap rumah sakit diantaranya untuk melakukan prosedur pencitraan diagnostik seperti sinar-X, CT-scan, pemindaian tulang, mamogram, MRI payudara, PET, dan pemeriksaan endoskopi [1]. Menurut (ICRP) batas penerimaan dosis yang direkomendasikan untuk dosis efektif adalah 20 mSv / tahun untuk aplikasi dalam paparan kerja dengan rata-rata selama 5 tahun (100 mSv), dengan ketentuan bahwa dosis efektif tidak boleh melebihi 50 mSv dalam satu tahun [2]. Radiasi pengion adalah gelombang elektromagnetik (foton) atau partikel energi yang akan menyebabkan proses ionisasi saat melewati material termasuk bahan biologis. Tingkat kerusakan yang ditimbulkan pada tubuh bergantung pada karakteristik jenis radiasi yang memiliki daya tembus dan berbagai tingkat

ionisasi. Interaksi radiasi dengan bahan biologis dimulai dengan interaksi fisik yaitu proses eksitasi / atau ionisasi, diikuti oleh interaksi fisikokimia dan respon biologis [3,4]. Pekerja radiasi berpotensi menerima paparan radiasi dengan dosis yang rendah. Dari hasil penelitian dilaporkan bahwa tingkat paparan di rumah sakit telah menurun dalam beberapa dekade terakhir dan menunjukkan di bawah batas yang diijinkan untuk pekerja radiasi dengan adanya peningkatan penggunaan prosedur seperti kardiologi intervensi dalam hal ini timbul beberapa kekhawatiran [5,6.]. Paparan radiasi pengion dengan dosis tinggi secara nyata dapat menginduksi efek akut dan kronis pada manusia, sementara potensi risiko yang terkait dengan dosis radiasi rendah masih menjadi masalah perdebatan [7,8].

Radiasi pengion dapat menyebabkan berbagai bentuk kerusakan DNA, termasuk kemungkinan terjadinya perubahan struktur kromosom atau dikenal dengan aberasi kromosom dan mikronuklei (MN). Aberasi kromosom adalah indikator biologis yang diakibatkan oleh paparan radiasi pengion. Kelompok aberasi kromosom disentrik (kromosom dengan dua sentromer) merupakan indikator spesifik akibat paparan radiasi pengion, dan telah menjadi metode biologis yang paling sensitive untuk memperkirakan dosis yang diterima terutama pada kasus kedaruratan.[9]. Biomonitoring dengan berbasis biomarker sitogenetik seperti aberasi kromosom dan mikronuklei telah banyak digunakan dalam mengevaluasi efek genotoksik paparan radiasi.[4,10]. Uji MN ini juga digunakan sebagai dosimetri biologi yang tepat untuk mengevaluasi paparan radiasi pengion baik yang berasal dari pekerjaan, kesehatan, individu pasca terapi dan kerentanan kanker [11].

Pada penelitian terdahulu frekuensi MN yang relative tinggi telah diamati pada individu yang terpapar radiasi pengion. Frekuensi MN pada limfosit darah perifer manusia telah digunakan sebagai parameter biologis spesifik untuk mengevaluasi efek paparan radiasi lingkungan dan efek kesehatan jangka panjang dari radiasi pengion [12,13]. Dalam laporan lain [14] telah dilakukan pemeriksaan aberasi kromosom serta mikronuklei dari limfosit perifer pekerja rumah sakit, yang secara profesional terpapar radiasi pengion dibandingkan dengan orang yang tidak terpapar. Rasio frekuensi MN sekitar 3: 2 pada kelompok yang terpapar radiasi dibandingkan dengan kontrol.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi potensi efek genotoksik radiasi berdasarkan pemeriksaan mikronuklei pada limfosit perifer manusia pada pekerja radiasi medis yang terpajan radiasi tingkat rendah.

METODOLOGI

Pengambilan Sampel

Sampel terdiri dari 12 pekerja radiasi medik yang berprofesi sebagai operator radiografer di rumah sakit dengan latar belakang masa kerja di lingkungan paparan radiasi rata-rata $16,41 \pm 9,94$ tahun (dari 4 sampai 34 tahun) dan kelompok kontrol terdiri dari 12 individu dari pekerja administrasi. Persetujuan etisnya

berasal dari Balitbangkes dengan nomor LB02.01 / 5.2 / KE.

Uji Sitokinesis Blok untuk pemeriksaan Mikronuklei (CBMN).

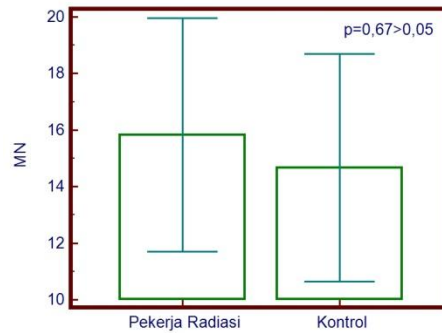
Uji CBMN- yang digunakan mengacu pada prosedur dari Fenech [10] dengan beberapa modifikasi. Kultur limfosit diinkubasi selama 72 jam pada suhu 37°C, cytochalasin-B (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO) pada konsentrasi akhir 3 µg / mL ditambahkan pada kultur untuk memblokir sitokinesis setelah inkubasi 44 jam. Kultur dihentikan pada suhu 72 jam, selanjutnya proses pemanenan dilakukan dengan sentrifugasi biakan pada 1000 rpm, dan melakukan penambahan dengan larutan hipotonik, Selanjutnya dilakukan penambahan larutan fiksative metanol: asam asetat (3: 1). Proses pembuatan preparat dilakukan dengan meneteskan limfosit pada slide kaca bersih dan diwarnai selama 10 menit dengan larutan Giemsa 4%. Pengamatan mikronuklei dilakukan di bawah mikroskop cahaya dengan pembesaran 40x10 dan parameter MN, diverifikasi dengan pembesaran 1000x. Penghitungan dan pencatatan MN dilakukan dari masing-masing sampel. Frekuensi sel binucleat yang mengandung satu atau lebih MN dicatat dalam setiap 1000 sel binucleat, untuk menentukan sitotoksitas sesuai dengan kriteria penilaian CBMN pada manual IAEA [4].

ANALISIS DATA.

Sebelum analisis data dilakukan uji normalitas menggunakan *Kolmogorove Smirnov test*. Dilakukan uji korelasi untuk mengetahui hubungan antara MN dengan masa kerja pada pekerja radiasi medik dan kontrol menggunakan *Medcalc Software* versi 9.102

HASIL DAN PEMBAHASAN

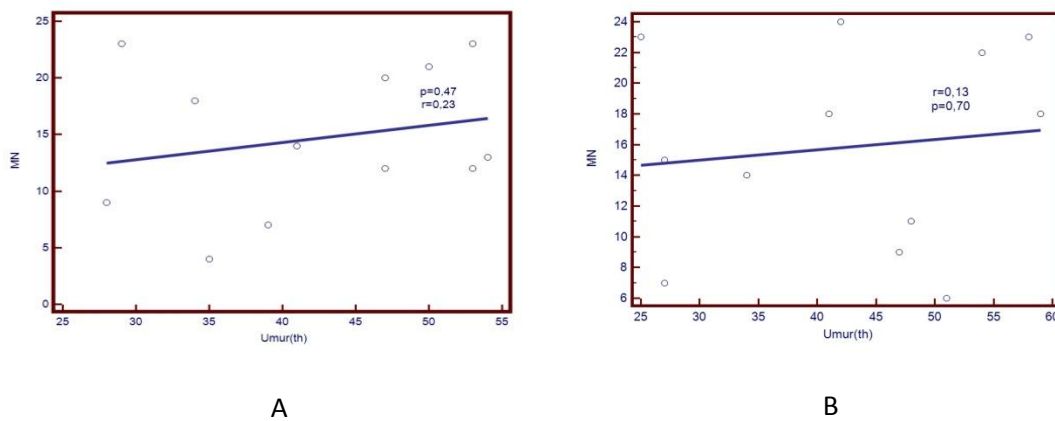
Dalam studi ini, pekerja medik yang secara fisik terkena radiasi pengion dipelajari secara sitogenetik untuk menilai kerusakan kromosom di dalam sel saat mikronuklei terbentuk dari fragmen asentrik atau keseluruhan kromosom yang tertinggal selama pembelahan sel [10]. Observasi frekuensi mikronukleus dilakukan di setiap 1000 sel binukleat per kultur. Distribusi frekuensi MN antara pekerja radiasi medik dibandingkan dengan subjek kontrol dijelaskan pada Gambar 1.



Gambar 1. Rerata frekuensi MN pada pekerja radiasi medik dan kontrol

Distribusi frekuensi MN pada pekerja medis bervariasi antara individu pada kisaran 6-24 / 1000 BNC sedangkan pada pekerja non radiasi berkisar pada kisaran 6-22 / 1000 BNC. Mengacu pada buku manual IAEA [4] frekuensi MN pada individu normal berkisar antara 0-36/1000 BNC. Pada penelitian ini frekuensi rerata MN pada pekerja radiasi medis adalah $(15,63 \pm 6,51)$ relatif lebih tinggi dari pada kontrol namun tidak ada perbedaan signifikan ($P = 0,67$). Frekuensi MN pada pekerja radiasi medis bervariasi antar individu dengan kisaran 6-23 / 1000 BNC sedangkan pada kelompok pekerja non radiasi berkisar antara 4-

23 / 1000 BNC. frekuensi MN di kedua kelompok masih dalam kisaran normal. Frekuensi rerata MN pada pekerja radiasi medik sedikit lebih tinggi dari pada kontrol namun tidak ada perbedaan yang signifikan ($P = 0,67$). Temuan ini sesuai dengan penelitian lain yang melaporkan dari peneliti lain bahwa frekuensi MN pada pekerja radiasi relative lebih tinggi namun tidak signifikan, [15]. Menurut Bonassi et al 2003 [16] beberapa faktor yang mempengaruhi peningkatan frekuensi mikronuklei disamping status paparan radiasi antara lain, jenis kelamin, kebiasaan merokok dan umur. Dalam studi ini korelasi frekuensi mikronuklei dan umur yang disajikan pada Gambar 2.



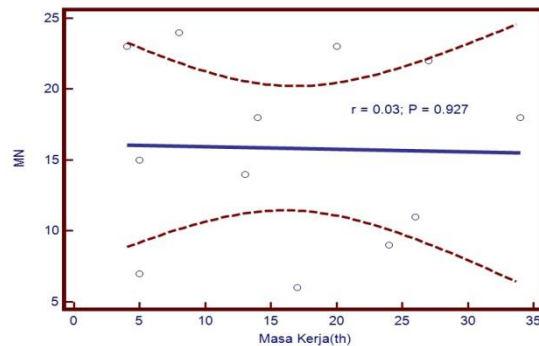
Gambar 2. Korelasi antara frekuensi MN dengan umur pada pekerja radiasi Medik (A) dan kontrol (B)

Pada gambar 2 terlihat bahwa sebaran antara frekuensi MN dengan umur baik pada pekerja radiasi medik maupun kontrol menunjukkan kecenderungan bahwa semakin tinggi usia frekuensi mikronuklei semakin tinggi kecuali pada kisaran umur 45 dan 50 pada pekerja radiasi meic. Hasil yang relatif sama juga dilaporkan pada penelitian Thierens yang

menyatakan terjadi kenaikan frekuensi mikronuklei pada sel binukleat sejalan dengan bertambahnya umur [17]. Menurut Hovhannisyanyan *et al.* (2012) secara umum frekuensi MN pada perempuan relative lebih tinggi dibanding laki-laki. Hal ini karena kromosom X pada perempuan dapat memicu pembentukan MN lebih banyak dibandingkan

pria. Namun dalam penelitian ini frekuensi MN pada kelompok pekerja radiasi maupun kontrol belum dikelompokkan berdasarkan jenis kelamin.

Berkaitan dengan lamanya masa kerja hubungan antara frekuensi mikronuklei dengan masa kerja disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Korelasi antara frekuensi MN dengan masa kerja pada pekerja radiasi medik

Dalam studi ini masa kerja tidak mempengaruhi tingkat frekuensi mikronuklei seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Terlihat bahwa tidak ditemukan adanya korelasi yang kuat antara frekuensi mikronuklei baik pada pekerja radiasi medik maupun pada kontrol. Hasil yang sama juga telah dilaporkan oleh peneliti lain bahwa frekuensi MN tidak terkait dengan tingkat paparan [1]. Durasi paparan dinyatakan sebagai lamanya pekerjaan, dan dalam beberapa kasus tidak terkait dengan paparan radiasi pengion secara terus menerus selama bertahun-tahun. Penelitian lebih lanjut perlu dilakukan dengan melibatkan jumlah sampel yang banyak dan mengelompokkan pekerja berdasarkan jenis kelamin yang dapat merepresentasikan efek paparan radiasi selain pada tingkat sel juga pada tingkat molekular untuk mengevaluasi adanya kerusakan tingkat DNA yang diakibatkan oleh paparan radiasi dosis rendah pada para pekerja radiasi medik

KESIMPULAN

Hasil studi menyimpulkan bahwa frekuensi MN k pada limfosit pekerja radiasi medik relative lebih tinggi dibanding non pekerja radiasi namun tidak ada perbedaan signifikan ($P = 0,67$). Tidak ditemukan adanya korelasi yang kuat antara frekuensi MN dan masa kerja baik pada pekerja radiasi maupun kontrol. Hasil ini menunjukkan bahwa paparan

radiasi yang diterima pekerja tidak berdampak secara signifikan pada frekuensi mikronuklei.

UCAPAN TERIMA KASIH

Studi ini didukung oleh PTKMR-BATAN. Terima kasih atas dorongan dan dukungannya dari Kepala PTKMR, Susetyo Trijoko, M.App. dan semua relawan Rumah Sakit yang telah memberikan sampel darah.

DAFTAR PUSTAKA

1. Monica R. et al. *The micronucleus assay as a biological dosimeter in hospital workers exposed to low doses of ionizing radiation*. Mutation Research 747, (2012), 7–13.
2. ICRP. *Avoidance of radiation injuries from medical interventional procedures*. ICRP Publication No. 85. Ann ICRP;30: (2000) 7–67.
3. Hall E, Graccia AJ. *Radiobiology for radiologist, 7th ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins;*, (2012) 13-33
4. Anonymous. *Cytogenetic Dosimetry: Applications In Preparedness For And Response To Radiation Emergencies*, Austria:International Atomic Energy Agency (2011).
5. Mettler, et al., *Effective doses in radiology and diagnostic nuclear medicine: a catalog*, Radiology 248.p (2008) 254–263
6. Faulkner, A. *An estimate of the collective dose to the European population from cardiac X-ray procedures*, Br. J. Radiol. 81 (2008) 955–962.
7. Brenner, R. et al. , *Cancer risks attributable to low doses of ionizing radiation: assessing what we really know*, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 100. (2003) p.13761–13766
8. Feinendegen L.E, Brooks A.L, Morgan W.F.. *Biological consequences and health risks Of low-level exposure to ionizing radiation: commentary on the workshop*, Health Phys. 100 p. (2011) 247–259.
9. Bofetta P, Van der Hel O, Norppa H et al. *Chromosomal aberrations and cancer risk: results of a cohort study from central Europe*. Am J Epidemiol ; (2007) 165:36–43.
10. Fenech, M. . *Cytokinesis-block micronucleus assay evolves into a “cytome” assay of chromosomal instability, mitotic dysfunction and cell death*, Mutat. Res. 600 p. (2006) 58
11. Thierens, H., VRAL, A., BARBE´, M. et al. *A cytogenetic study of nuclear power plant*

- workers using the micronucleus-centromere assay. *Mutat. Res.*, (1999);445, 105–111
12. Neronova. E, Slozina, N., Nikiforov, A. *Chromosome alterations in cleanup workers sampled years after the Chernobyl accident*, *Radiat. Res.* 160. (2003) 46–51
 13. Kharchenko.T, et al. *Cytogenetic investigation of occupationally irradiated persons along time after exposure*, *Appl. Radiat. Isot.* 52 (2000).1161–1164.
 14. Cardoso RS, et al.. *Evaluation of chromosomal aberrations, micronuclei, and sister chromatid exchanges in hospital workers chronically exposed to ionizing radiation*. *Teratog Carcinog Muta-gen*, 21(6): (2001) 431-9.
 15. Maffei, Francesca et al.. “*Micronuclei Frequencies in Hospital Workers Occupationally Exposed to Low Levels of Ionizing Radiation: Influence of Smoking Status and Other Factors.*” 17(5): (2002) 405–409
 16. Bonassi S, et.al *Effect of smoking habit on the frequency of micronuclei in human lymphocytes: results from the Human Micro Nucleus project*. *Mutat Res*, 543(2): (2003)155–166.
 17. Hovhannisyan G, Aroutiounian R, Liehr T. *Chromosomal composition of micronuclei in human leukocytes exposed to mytomyacin c*. *Journal of Histochemistry & Cytochemistry* Vol. 60(4): (2012) 316-322.

Tanya Jawab

Penanya : EM. Wardhana

Pertanyaan :

- 1.a. Pekerja radiasi yang dianalisis itu sudah bekerja di bidang radiasi sudah berapa lama, apakah sama satu dan lainnya, ? kalau berbeda adakah pengaruhnya ?
- 1.b. Berapa paparan radiasi yang aman diterima oleh pekerja radiasi tersebut dan berapa lama bisa dianggap aman. ?

Jawaban :

- 1.a. Dalam penelitian ini, masa kerja para pekerja radiasi yang diambil sampel darahnya berkisar antara 4-34 tahun dengan rerata 16,41. Dari hasil pengamatan menunjukkan bahwa tidak terlihat adanya pengaruh perbedaan antara masa kerja dan frekuensi MN.
- 1.b. Berdasarkan peraturan BAPETEN, paparan radiasi yang diijinkan untuk diterima pekerja radiasi dalam setahun adalah 20 mSv/tahun

PENERAPAN TINGKAT KLIRENS PADA LIMBAH RADIOAKTIF PADAT TERKOMPAKSI DI PTKMR-BATAN

Suhaedi Muhammad, Susyati, Eti Hartati,

Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi-BATAN, Kawasan Nuklir Pasar Jumat

email :Suhaedi.muhammad62@gmail.com

ABSTRAK

PENERAPAN TINGKAT KLIRENS PADA LIMBAH RADIOAKTIF PADAT TERKOMPAKSI DI PTKMR-BATAN. Kegiatan penelitian dan pengembangan (litbang) Kedokteran Nuklir diagnostik *in vivo* di Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi – Badan Tenaga Nuklir Nasional (PTKMR-BATAN) menghasilkan limbah radioaktif berumur-paruh sangat pendek bentuk padat terbakar, padat terkompaksi dan cair. Dalam rangka mengelola limbah radioaktif bentuk padat terkompaksi, pihak pemegang izin (PI) dapat menerapkan peraturan tentang tingkat klirens sebagaimana tercantum pada Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 16 Tahun 2012 tentang Tingkat Klirens. Tingkat Klirens adalah nilai (dinyatakan dalam konsentrasi radioaktivitas, Bq/g) yang ditetapkan oleh BAPETEN, dimana pada atau di bawah nilai tersebut limbah radioaktif baik dalam bentuk zat radioaktif sumber terbuka maupun bentuk material terkontaminasi dan/atau teraktivasi dapat dibebaskan dari pengawasan BAPETEN. Tujuan penerapan tingkat klirens di sini dimaksudkan untuk memastikan bahwa limbah padat terkompaksi yang dihasilkan dari pelaksanaan kegiatan kelompok litbang kedokteran nuklir diagnostik *in-vivo* di PTKMR-BATAN termasuk dalam kategori limbah radioaktif ataukah termasuk limbah biasa. Untuk itu telah dilakukan pengukuran radioaktivitas (yang dilanjutkan dengan penghitungan konsentrasi radioaktivitas) dan penerapan tingkat klirens pada limbah radioaktif bentuk padat terkompaksi berupa semprit (*syringe*) yang terkontaminasi radionuklida Tc-99m. Dari pengukuran dan penghitungan diketahui bahwa konsentrasi radioaktivitas semprit berada dibawah tingkat klirens yang ditetapkan pada lampiran I Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 16 Tahun 2012 untuk radionuklida Tc-99m yaitu 100 Bq/g. Dengan demikian, semprit yang telah memenuhi kriteria untuk klirens tersebut dapat dikelola bukan sebagai limbah radioaktif tetapi sebagai limbah infeksius pada umumnya.

Kata Kunci : penerapan tingkat klirens, limbah radioaktif padat terkompaksi

ABSTRACT

APPLICATION OF CLEARANCE LEVEL IN SOLID COMPACTED RADIOACTIVE WASTE AT PTKMR-BATAN. In vivo diagnostic nuclear medicine research and development (R&D) activities at Center for Technology of Radiation Safety and Metrology - National Nuclear Energy Agency (PTKMR-BATAN) produces very short-lived radioactive waste in the form of solid burnt, solid compacted and liquid. In managing of solid compacted radioactive waste, the licensee (PI) may apply the regulation on clearance level as stated in the Regulation of the Head of Nuclear Energy Regulatory Agency (BAPETEN) Number 16 Year 2012 on the Level of Clearance. The level of clearance is the value (expressed in concentrations of radioactivity, Bq/g) determined by BAPETEN, where at or below the value of the radioactive waste either in the form of an open source or contaminated and/or activated material could be exempt from BAPETEN control. The objectives of the application of the level of clearance here are to ensure that compacted solid waste resulting from the implementation of in-vivo diagnostic nuclear research R & D activities in PTKMR-BATAN is included in the category of radioactive waste or belonging to ordinary waste. Radioactivity measurements (followed by calculation of radioactivity concentration) and application of clearance level have been performed on solid compacted radioactive waste in the form of contaminated syringe of Tc-99m radionuclide. From measurement and calculation, it is known that the radioactivity concentration of syringe is below the clearance level specified in Attachment I of Regulation of Head of BAPETEN Number 16 Year 2012 for Tc-99m radionuclide of 100 Bq/g. Thus, the syringe that meets the criteria for clearance can be managed not as radioactive waste but as infectious waste in general.

Keywords : application of clearance level, solid compacted radioactive waste

PENDAHULUAN

Pusat Teknologi Keselamatan Dan Metrologi Radiasi – Badan Tenaga Nuklir Nasional (PTKMR-BATAN) berdasarkan Peraturan Kepala BATAN Nomor 14 Tahun 2013 tentang Organisasi Dan Tata Kerja BATAN adalah salah satu unit yang ada di lingkungan BATAN yang memiliki tugas membuat perumusan dan pengendalian kebijakan teknis,

pelaksanaan, dan pembinaan dan bimbingan di bidang penelitian dan pengembangan di bidang radioekologi, teknik nuklir kedokteran dan biologi radiasi, keselamatan kerja dan dosimetri dan metrologi radiasi [1].

Pelaksanaan kegiatan penelitian dan pengembangan (litbang) bidang teknik nuklir kedokteran dan biologi radiasi khususnya kelompok litbang kedokteran nuklir diagnostik *in-vivo*, menghasilkan limbah radioaktif berumur

paruh sangat pendek dalam bentuk padat terbakar, padat terkompaksi dan cair.

Guna menjamin keselamatan dan kesehatan baik bagi manusia maupun lingkungan, maka di dalam Peraturan Pemerintah Nomor 61 Tahun 2013 tentang Pengelolaan Limbah Radioaktif pasal 21 disebutkan bahwa : Penghasil Limbah Radioaktif wajib melakukan pengumpulan dan pengelompokan zat radioaktif terbuka yang tidak digunakan dan bahan serta peralatan yang terkontaminasi dan/atau teraktivasi yang tidak digunakan. Sedangkan di dalam Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN) Nomor 8 tahun 2016 tentang Pengolahan Limbah Radioaktif Tingkat Rendah Dan Tingkat Sedang disebutkan bahwa Penghasil Limbah wajib melakukan prapengolahan, penyimpanan sementara dan pengiriman [2,3].

Dalam rangka mengelola limbah radioaktif yang dihasilkan oleh kegiatan kelompok litbang kedokteran nuklir diagnostik *in-vivo* di PTKMR-BATAN, khususnya limbah radioaktif padat terkompaksi, pihak pemegang izin (PI) dapat menerapkan peraturan tentang tingkat klirens sebagaimana tercantum pada Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 16 Tahun 2012 tentang Tingkat Klirens [4].

Dengan diterapkannya tingkat klirens ini maka diharapkan dapat diketahui apakah limbah padat terkompaksi yang dihasilkan dari pelaksanaan kegiatan kelompok litbang kedokteran nuklir diagnostik *in-vivo* di PTKMR-BATAN termasuk dalam kategori limbah radioaktif atukah termasuk limbah biasa. Sudah barang tentu limbah padat terkompaksi ini tidak boleh secara sembarangan dibuang ke lingkungan meskipun permohonan penetapan tingkat klirens telah disetujui oleh Kepala BAPETEN.

METODOLOGI

Bahan dan peralatan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penerapan tingkat klirens untuk bahan terkontaminasi kategori padat terkompaksi yang dihasilkan dari pelaksanaan kegiatan kelompok litbang kedokteran nuklir diagnostik *in-vivo* di PTKMR-BATAN ini terdiri dari :

1. Sarung tangan karet (*hand gloves*).
2. Masker 3M.
3. Tutup Kepala.
4. Monitor personil (TLD-badge).
5. Kertas whatman-41
6. Kantong plastik zicklock.
7. *Multy Channel Analyzer* (MCA).
8. Surveymeter raduiasi gamma.
9. Pinset.
10. Planset.

11. Kantong plastik limbah.

Metode

Metode yang digunakan dalam penentuan tingkat klirens untuk bahan terkontaminasi kategori padat terkompaksi yang yang dihasilkan dari pelaksanaan kegiatan kelompok litbang kedokteran nuklir diagnostik *in-vivo* di PTKMR-BATAN adalah metode eksperimen yang terdiri dari :

1. Pengukuran laju paparan radiasi.
2. Penimbangan berat syringe.
3. Tes usap dengan menggunakan kertas whatman-41.
4. Pencacahan hasil tes usap dengan menggunakan *Multy Channel Analyzer* (MCA).
5. Penentuan aktivitas.
6. Penentuan konsentrasi aktivitas.
7. Perbandingan nilai konsentrasi aktivitas dengan nilai klirens yang ditetapkan oleh BAPETEN.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengambilan Bahan Terkontaminasi Kategori Padat Terkompaksi Dari Daerah Kerja (Ruang Teknik Nuklir Kedokteran).

Telah dilakukan pengambilan bahan terkontaminasi kategori padat terkompaksi dalam bentuk semprit (*syringe*) dari ruang Teknik Nuklir Kedokteran (TNK) pada tanggal 22 September 2015 dengan hasil sebagai berikut [5] :

1. Banyaknya limbah yang diambil : 1(satu) kardus berisi 150 buah *syringe*
2. Berat total limbah : 4(empat) kg
3. Zat kontaminan : Tc-99m
4. Laju paparan radiasi latar : 0,045 $\mu\text{Sv/jam}$
5. Laju paparan radiasi permukaan kardus : 165,7 $\mu\text{Sv/jam}$

Penentuan Berat, Luas Permukaan Dan Laju Paparan Radiasi Pada *Syringe*.

Untuk keperluan penentuan konsentrasi aktivitas dari masing-masing *syringe*, dari total 150 buah semprit (*syringe*) diambil sebanyak 10 (sepuluh) buah semprit (*syringe*) dengan laju paparan radasi yang terbesar. Sebelum menentukan nilai konsentrasi aktivitas dari masing-masing semprit (*syringe*) terlebih dahulu dilakukan penimbangan berat semprit (*syringe*) pengukuran luas permukaan semprit (*syringe*) dan pengukuran laju paparan radiasi pada masing-masing permukaan semprit (*syringe*) . Penimbangan berat dan pengukuran luas permukaan semprit (*syringe*) dilakukan dengan

menggunakan semprit (*syringe*) yang tidak terkontaminasi dengan spesifikasi yang sama. Pengukuran telah dilakukan pada tanggal 17

November 2015 dengan hasil secara lengkap diberikan pada Tabel 1 [5].

Tabel 1. Berat, Luas Permukaan Dan Laju Paparan Radiasi Pada semprit (*syringe*)

No.	Identitas Syringe	Berat Syringe (gram)	Luas Permukaan Syringe (cm ²)	Laju Paparan Radiasi (uSv/j)		Jenis Isotop
				Latar	Hasil	
01.	Syringe 1	20	19,5	0,045	0,055	Tc-99m
02.	Syringe 2	20	19,5	0,045	0,095	Tc-99m
03.	Syringe 3	20	19,5	0,045	0,085	Tc-99m
04.	Syringe 4	20	19,5	0,045	0,075	Tc-99m
05.	Syringe 5	20	19,5	0,045	0,155	Tc-99m
06.	Syringe 6	20	19,5	0,045	0,055	Tc-99m
07.	Syringe 7	20	19,5	0,045	0,065	Tc-99m
08.	Syringe 8	20	19,5	0,045	0,085	Tc-99m
09.	Syringe 9	20	19,5	0,045	0,165	Tc-99m
10.	Syringe10	20	19,5	0,045	0,075	Tc-99m

Penentuan Konsentrasi Aktivitas *Syringe*

Penentuan nilai konsentrasi aktivitas dari masing-masing semprit (*syringe*) dilakukan dengan tes usap pada permukaan bagian luar dan dalam *syringe* menggunakan kertas wathman-41

kemudian hasilnya dicacah dengan menggunakan MCA. Hasil penentuan konsentrasi aktivitas dari masing-masing semprit (*syringe*) secara lengkap diberikan pada Tabel 2 [5].

Tabel 2. Konsentrasi Aktivitas Untuk Masing-Masing Semprit (*syringe*)

No.	Identitas Syringe	Berat Syringe (gram)	Laju Paparan Radiasi (uSv/j)		Jenis Isotop	Aktivitas (Bq)	Konsentrasi Aktivitas (Bq/gram)
			Latar	Hasil			
01.	Syringe 1	20	0,045	0,055	Tc-99m	1,853	0,0927
02.	Syringe 2	20	0,045	0,095	Tc-99m	4,563	0,2282
03.	Syringe 3	20	0,045	0,085	Tc-99m	3,608	0,1804
04.	Syringe 4	20	0,045	0,075	Tc-99m	4,797	0,2399
05.	Syringe 5	20	0,045	0,155	Tc-99m	8,892	0,4446
06.	Syringe 6	20	0,045	0,055	Tc-99m	2,886	0,1445
07.	Syringe 7	20	0,045	0,065	Tc-99m	4,836	0,2418
08.	Syringe 8	20	0,045	0,085	Tc-99m	4,836	0,2418
09.	Syringe 9	20	0,045	0,165	Tc-99m	5,538	0,2769
10.	Syringe10	20	0,045	0,075	Tc-99m	4,758	0,2379

Penentuan Nilai Klierens

Mengacu pada Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 16 Tahun 2012 tentang Tingkat Klierens, penentuan nilai klierens untuk bahan terkontaminasi kategori padat terkompaksi seperti semprit (*syringe*) dapat dilakukan dengan cara sebagai berikut :

1. Pemantauan laju paparan radiasi pada permukaan dan jarak satu meter.
2. Pemantauan dilakukan dengan menggunakan surveymeter radiasi gamma dalam satuan mR/jam atau uSv/jam.

3. Penentuan konsentrasi aktivitas dan kuantitas radionuklida.

4. Untuk menentukan konsentrasi aktivitas dan kuantitas radionuklida yang ada pada bahan terkontaminasi kategori padat terkompaksi seperti semprit (*syringe*) ini, dapat ditentukan dengan cara :

- a. Tes usap pada permukaan bagian luar dan dalam semprit (*syringe*) dengan menggunakan kertas saring whatman-41 kemudian hasilnya dicacah

dengan alat cacah gamma dimana hasil yang diperoleh dalam bentuk nilai tingkat kontaminasi permukaan dengan satuan Bq/cm².

- b. Bahan terkontaminasi ditimbang beratnya kemudian dilakukan tes usap pada permukaan bagian dalam semprit (*syringe*) dengan menggunakan kertas saring whatman-41 kemudian hasilnya dicacah dengan menggunakan

Multy Channel Analyzer (MCA) sehingga diperoleh jenis radionuklida dan konsentrasinya dalam satuan Bq/gram.

Berdasarkan ketentuan tersebut di atas dan dari hasil pengukuran konsentrasi aktivitas semprit (*syringe*) selanjutnya dibandingkan dengan nilai klierens yang ditetapkan di dalam Lampiran I Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 16 Tahun 2012. Hasilnya secara lengkap diberikan pada Tabel 3 [5].

Tabel 3. Perbandingan Nilai Konsentrasi Aktivitas

No.	Identitas Syringe	Berat Syringe (gram)	Laju Paparan Radiasi (uSv/j)		Jenis Isotop	Konsentrasi Aktivitas (Bq/gram)	
			Latar	Hasil		Hasil Pengukuran	Batas Yang Ditentukan
01.	Syringe 1	20	0,045	0,055	Tc-99m	0,0927	100
02.	Syringe 2	20	0,045	0,095	Tc-99m	0,2282	100
03.	Syringe 3	20	0,045	0,085	Tc-99m	0,1804	100
04.	Syringe 4	20	0,045	0,075	Tc-99m	0,2399	100
05.	Syringe 5	20	0,045	0,155	Tc-99m	0,4446	100
06.	Syringe 6	20	0,045	0,055	Tc-99m	0,1445	100
07.	Syringe 7	20	0,045	0,065	Tc-99m	0,2418	100
08.	Syringe 8	20	0,045	0,085	Tc-99m	0,2418	100
09.	Syringe 9	20	0,045	0,165	Tc-99m	0,2769	100
10.	Syringe10	20	0,045	0,075	Tc-99m	0,2379	100

Dari Tabel 3 di atas, dapat dilihat bahwa :

1. Nilai laju paparan radiasi pada masing-masing permukaan semprit (*syringe*) relatif sangat kecil sehingga tidak akan mengakibatkan adanya penerimaan dosis yang lebih besar dari 1 mSv/tahun.
2. Nilai rata-rata konsentrasi aktivitas semprit (*syringe*) nilainya relatif sangat kecil ($0,2329 \pm 0,0926$ Bq/g) bila dibandingkan dengan nilai klierens yang ditetapkan di dalam lampiran I Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 16 Tahun 2012 (100 Bq/g) .

Berdasarkan uraian tersebut di atas, karena nilai klierens dari masing-masing semprit (*syringe*) relatif sangat kecil bila dibandingkan dengan yang ditetapkan oleh Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 16 Tahun 2012, maka semprit (*syringe*) tersebut dibebaskan dari pengawasan BAPETEN.

Penetapan Nilai Klierens

Berdasarkan hasil pengukuran konsentrasi aktivitas untuk semprit (*syringe*) dengan zat kontaminan Tc-99m dan dengan mengacu pada

lampiran I Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 16 Tahun 2012, maka dapat ditetapkan nilai klierens untuk zat kontaminan Tc-99m paling besar 10% dari nilai klierens yang ditetapkan oleh BAPETEN.

KESIMPULAN

Berdasarkan uraian tersebut di atas, dapat disimpulkan bahwa nilai laju paparan radiasi pada masing-masing permukaan semprit (*syringe*) relatif sangat kecil sehingga tidak akan mengakibatkan adanya penerimaan dosis yang lebih besar dari 1 mSv/tahun. Begitupun nilai rata-rata konsentrasi aktivitas semprit (*syringe*) ($0,2329 \pm 0,0926$ Bq/g) relatif sangat kecil bila dibandingkan dengan nilai klierens yang ditetapkan di dalam lampiran I Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 16 Tahun 2012 (100 Bq/g). Berdasarkan hasil pengukuran ini dapat diusulkan nilai klierens untuk zat kontaminan Tc-99m dapat ditetapkan paling besar 10% dari nilai klierens yang ditetapkan oleh BAPETEN dan limbah padat terkompaksi berupa semprit/syringe dapat dibebaskan dari pengawasan BAPETEN.

DAFTAR PUSTAKA

1. Badan Tenaga Nuklir Nasional, Peraturan Kepala BATAN Nomor 14 Tahun 2013 tentang Organisasi Dan Tata Kerja BATAN, Jakarta, 2013.
2. Sekretariat Negara, Peraturan Pemerintah No. 61 Tahun 2013 Tentang Pengelolaan Limbah Radioaktif, Jakarta, 2002.
3. Badan Pengawas Tenaga Nuklir, Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 8 Tahun 2016 tentang Pengolahan Limbah Radioaktif Tingkat Rendah dan Tingkat Sedang, Jakarta, 2016.
4. Badan Pengawas Tenaga Nuklir, Peraturan Kepala BAPETEN nomor 16 Tahun 2012 tentang Tingkat Klirens, Jakarta, 2012.
5. Pusat Teknologi Keselamatan Dan Metrologi Radiasi, Laporan Hasil Penanganan Limbah Radioaktif Periode 2015, Jakarta, 2015.

ASPEK RADIOLOGI PADA PENYIMPANAN HASIL PENGONDISIAN ZAT RADIOAKTIF TERBUNGKUS YANG TIDAK DIGUNAKAN DI FASILITAS PENYIMPANAN SEMENTARA LIMBAH AKTIVITAS TINGGI (PSLAT)

Suhartono, Muhamad Nurhasyim, Jati Eka Putri

Pusat Teknologi Limbah Radioaktif – Badan Tenaga Nuklir Nasional

suhartono@batan.go.id

ABSTRAK

ASPEK RADIOLOGI PADA PENYIMPANAN HASIL PENGONDISIAN ZAT RADIOAKTIF TERBUNGKUS YANG TIDAK DIGUNAKAN DI FASILITAS PENYIMPANAN SEMENTARA LIMBAH AKTIVITAS TINGGI (PSLAT). Hasil pengondisian zat radioaktif terbungkus kategori 3 – 5 yang tidak digunakan (ZRTTD) berupa kapsul-kapsul stainless steel diameter 5 cm dan tinggi 12,5 cm yang di dalamnya berisi ZRTTD yang telah didismantling. Kapsul hasil pengondisian ZRTTD tersebut memiliki laju dosis radiasi tinggi. Penyimpanan kapsul stainless steel hasil pengondisian ZRTTD di ruangan penyimpanan Interim Storage 1 (IS-1) atau Interim Storage 2 (IS-2) berpotensi memberikan paparan radiasi relatif tinggi terhadap daerah kerja. Telah dilakukan kajian radiologi pada penyimpanan kapsul hasil pengondisian ZRTTD kategori 3 – 5 di fasilitas sumuran PSLAT. Kajian dilakukan menggunakan software MicroShield version 7.02, untuk 8 kapsul stainless steel berisi aktivitas total Co-60 0,33 Ci; Cs-137 14,01 Ci; dan Am-241 0,36 Ci yang disimpan dalam sumuran PSLAT dengan kedalaman 4 m. Hasil perhitungan menunjukkan laju dosis radiasi sebesar 0,284 mR/jam ($\approx 2,84 \mu\text{Sv/jam}$) pada permukaan sumur. Nilai laju dosis tersebut masih berada di bawah batasan laju dosis ruangan tersebut yang telah ditetapkan sebesar 25 $\mu\text{Sv/jam}$. Dengan demikian penyimpanan kapsul-kapsul hasil pengondisian ZRTTD kategori 3 – 5 di dalam drum stainless steel 60 liter dan dimasukkan ke dalam sumuran PSLAT dapat mengurangi laju paparan radiasi, sehingga aman bagi daerah kerja, pekerja radiasi, dan lingkungan.

Kata kunci : limbah, radioaktif, pengondisian, ZRTTD, PSLAT

ABSTRACT

RADIOLOGY ASPECT ON THE STORAGE OF RESULT OF CONDITIONING DISUSED SEALED RADIOACTIVE SOURCES (DSRS) IN INTERIM STORAGE FOR HIGH ACTIVITY RADIOACTIVE WASTE FACILITIES. The result of conditioning of disused sealed radioactive sources (DSRS) category 3-5 are stainless steel capsules with 5 cm diameter and 12.5 cm height, it contains DSRS which has been dismantled. The DSRS conditioning capsule has a high radiation dose rate. Storage of DSRS stainless steel conditioning capsules in storage rooms Interim Storage 1 (IS-1) or Interim Storage 2 (IS-2) has potential to provide relatively high radiation exposure to the working area. Radiology studies were performed on conditioning capsule of DSRS category 3-5 in Interim Storage for High Activity Radioactive Waste Facilities. Calculations were conducted using MicroShield software version 7.02, for 8 stainless steel capsules with total activity Co-60 0.33 Ci; Cs-137 14.01 Ci; and Am-241 0.36 Ci stored in Interim Storage for High Activity Radioactive Waste wells with a depth of 4 m. The calculation result revealed that a radiation dose rate of 0.284 mR/h ($\approx 2.84 \mu\text{Sv/h}$) on the surface of the well. The dose rate is still below the room dose rate limit which has been determined of 25 $\mu\text{Sv/h}$. Thus storage of DSRS category 3-5 conditioning capsules in 60 liters stainless steel drums and inserted into Interim Storage for High Activity Radioactive Waste wells can reduce the dose rate of radiation exposure, making it safe for working areas, radiation workers, and the environment.

Keywords: waste, radioactive, conditioning, DSRS, Interim Storage for High Activity Radioactive Waste (ISHARW)

PENDAHULUAN

Fasilitas Penyimpanan Sementara Limbah Aktivitas Tinggi (PSLAT) merupakan salah satu fasilitas yang dimiliki oleh PTLR-BATAN yang berfungsi untuk :⁽¹⁾

- Menyimpan limbah radioaktif aktivitas tinggi agar aman dan tidak membahayakan bagi lingkungan,
- Menyimpan sementara limbah radioaktif aktivitas tinggi untuk meluruhkan menjadi limbah aktivitas/radiasi sedang agar dapat diproses lebih lanjut di

Instalasi Pengolahan Limbah Radioaktif (IPLR), PTLR-BATAN.

Bangunan PSLAT memiliki panjang 15 m dan lebar 7,9 m. Tempat penyimpanan limbah radioaktif aktivitas tinggi di PSLAT terdiri dari 2 (dua) jenis yaitu tipe sumuran dan tipe kolam. Tipe sumuran digunakan untuk menyimpan limbah radioaktif aktivitas tinggi berdimensi kecil yang dapat dimasukkan ke dalam drum *stainless steel* volume 60 l atau 100 l. Jumlah total sumuran yang terdapat di PSLAT adalah 20 buah yang diberi kode penomoran A1 – A5, B1 – B5, C1 – C5, dan D1 – D5. Setiap sumuran

memiliki diameter dalam sebesar 60 cm dengan kedalaman 4 m. Dinding sumuran terbuat dari beton dengan ketebalan 10 cm. Tutup sumuran berupa silinder beton setebal 33 cm dan dilapisi dengan timbal (Pb) setebal 5 cm.

Fasilitas penyimpanan tipe kolam terdiri dari 3 buah kolam dengan dimensi masing-masing 3 m x 2,12 m x 4 m; 1,2 m X 2,12 m x 4 m; 3,6 m x 1,93 m x 4 m; dan 1 kotak untuk lubang inspeksi dengan ukuran 2,5 m x 1,93 m x 4 m. Dinding-dinding kolam PSLAT terbuat dari beton dengan ketebalan 10 cm. Sedangkan penutup kolam PSLAT terbuat dari beton setebal 25 cm dan dilapisi timbal (Pb) setebal 5 cm. Fasilitas penyimpanan tipe kolam digunakan untuk menyimpan limbah radioaktif aktivitas tinggi yang memiliki dimensi besar. Gambar 1 dan Gambar 2 menunjukkan gambar fasilitas penyimpanan yang ada di PSLAT.



Gambar 1. Fasilitas penyimpanan tipe sumuran



Gambar 2. Fasilitas penyimpanan tipe kolam

Untuk pengoperasian, PSLAT dilengkapi dengan beberapa sarana dukung antara lain *crane* dengan kapasitas 15 ton, dan *transfer cask* yang terbuat dari timbal (Pb) tebal 7,5 cm. Untuk memasukkan drum stainless steel 60 l atau 100 l ke dalam sumuran, PSLAT dilengkapi dengan sistem magnetik yang dapat mengangkat beban sampai dengan 300 kg.

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^[2]. Salah satu jenis limbah radioaktif yang banyak ditimbulkan dari kegiatan pemanfaatan zat radioaktif di bidang industri adalah zat radioaktif terbungkus yang tidak digunakan (ZRTTD) yang biasanya disebut sebagai sumber bekas. 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^[3].

Sumber radioaktif dikelompokkan menjadi 5 (lima) kategori^[4]. 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 :

- Kategori 1. *Extremely dangerous to the person*. Sumber radioaktif yang termasuk kategori 1 memiliki rasio A/D ≥ 1000 .
- Kategori 2. *Very dangerous to the person*. Sumber radioaktif yang termasuk kategori 2 memiliki rasio $1000 > A/D \geq 10$.
- Kategori 3. *Dangerous to the person*. Sumber radioaktif yang termasuk kategori 3 memiliki rasio $10 > A/D \geq 1$.
- Kategori 4. *Unlikely to be dangerous to the person*. Sumber radioaktif yang termasuk kategori 4 memiliki rasio $1 > A/D \geq 0.01$.
- 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).

Untuk sumber radioaktif yang terdiri dari beberapa jenis radionuklida, *aggregate A/D* dihitung menggunakan persamaan :^[4]

$$\text{Aggregate } \frac{A}{D} = \sum \frac{\sum_i A_{i,n}}{D_n}$$

dengan :

$A_{i,n}$ = aktivitas tiap sumber radioaktif i dari jumlah sumber radioaktif (radionuklida) n
 D_n = nilai D untuk jumlah sumber radioaktif (radionuklida) n

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].

Strategi pengelolaan ZRTTD kategori 3 – 5 di PTLR-BATAN berupa pengondisian dalam kapsul-kapsul *stainless steel* berdimensi tinggi 12,5 cm dan diameter 5 cm. Setiap unit ZRTTD dibongkar untuk diambil sumber radioaktif-nya. Pembongkaran unit ZRTTD mengikuti instruksi teknis pedoman pembongkaran dari *International Atomic Energy Agency (IAEA)*. Selanjutnya sumber-sumber radioaktif tersebut dikondisioning dalam kapsul *stainless steel* dan ditutup/dilas. Jumlah sumber radioaktif dalam setiap kapsul hasil pengondisian bervariasi, tergantung dimensi dan aktivitas dari sumber radioaktif yang dikondisioning. Setiap kapsul *stainless steel* berisi 1 (satu) jenis radionuklida.

Laju dosis radiasi setiap kapsul *stainless steel* hasil pengondisian ZRTTD menjadi tinggi akibat akumulasi aktivitas radionuklida. Ada yang mencapai 5,6 mSv/jam pada jarak 1 m dari permukaan kapsul. Saat ini kapsul-kapsul hasil pengondisian ZRTTD tersebut dimasukkan ke dalam *shell drum* 200 l dan disimpan di ruang sumber *Interim Storage 2* PTLR – BATAN. Laju dosis radiasi *shell drum* 200 l tersebut juga masih relatif tinggi, sampai dengan 2,29 mSv/jam pada kontak permukaan *shell drum* 200 l. Laju dosis radiasi tersebut dapat memberikan radiasi berlebih pada daerah kerja dan ruang perkantoran di sekitarnya.

Untuk mewujudkan prinsip *as low as reasonably achievable (ALARA)* pada pengelolaan limbah radioaktif di PTLR-BATAN, kapsul-kapsul *stainless steel* hasil pengondisian ZRTTD kategori 3 – 5 tersebut direncanakan akan disimpan di salah satu sumuran fasilitas PSLAT. Fasilitas sumuran di PSLAT merupakan sistem penyimpanan di bawah permukaan tanah, sehingga diharapkan laju dosis radiasi tinggi dari masing-masing kapsul hasil pengondisian ZRTTD dapat direduksi sehingga aman bagi pekerja dan daerah kerja sekitarnya.

Penyimpanan pada fasilitas sumuran PSLAT juga dapat digunakan sebagai fungsi penundaan dalam sistem keamanan penyimpanan zat/limbah radioaktif. Dengan demikian penyimpanan kapsul-kapsul hasil pengondisian ZRTTD di salah satu sumuran PSLAT dapat lebih menjamin keselamatan dan keamanan pengelolaan ZRTTD terhadap pekerja, masyarakat, dan lingkungan sekitar.

Software MicroShield Version 7.02 adalah *software* komputer buatan *Grove Software Inc, Lynchburg, Virginia USA* yang dapat digunakan untuk menghitung laju dosis radiasi dari sumber-sumber radioaktif berbagai macam bentuk yang melewati berbagai ketebalan dan jenis *shielding*. Kelebihan lain dari *software MicroShield Version 7.02* adalah dapat menghitung laju dosis radiasi dari sumber radioaktif yang terdiri dari campuran beberapa radionuklida.

Tujuan dari kegiatan ini adalah untuk mendapatkan gambaran tingkat radiasi pada upaya penyimpanan hasil pengondisian ZRTTD di dalam sumuran PSLAT. Dalam makalah ini akan dikaji potensi radiasi dalam upaya penyimpanan ZRTTD di fasilitas sumuran PSLAT. Fokus utama pembahasan berupa kajian laju dosis radiasi di daerah kerja PSLAT. Batasan laju paparan radiasi di daerah pengendalian PSLAT adalah 25 μ Sv/jam^[5]. Dengan demikian diharapkan penyimpanan ZRTTD di sumuran PSLAT tidak mengakibatkan laju paparan radiasi pada daerah kerja PSLAT melebihi 25 μ Sv/jam.

METODOLOGI

Kajian dilakukan dengan menggunakan *software MicroShield version 7.02* dengan data pendukung berupa data hasil identifikasi kegiatan pengondisian ZRTTD yang sudah dilakukan. Tahap pertama dilakukan pengumpulan data-data dan identifikasi sumber-sumber radioaktif hasil pengondisian ZRTTD. Data yang diperlukan dalam tahapan ini berupa identitas kapsul, jumlah sumber, jenis radionuklida, dan aktivitas total radionuklida. Dilakukan juga studi disain dan gambar-gambar PSLAT dan pengukuran dimensi sumuran PSLAT beserta penutupnya. Selanjutnya berdasarkan data-data tersebut dilakukan kajian laju dosis radiasi menggunakan *software MicroShield version 7.02*. Hasil perhitungan *software MicroShield version 7.02* selanjutnya dianalisis dan dibandingkan dengan batasan parameter keselamatan radiasi daerah kerja PSLAT yang sudah ditetapkan dalam Program Proteksi dan Keselamatan Radiasi IPLR.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel 1 berikut ini adalah data radioaktivitas dari masing-masing kapsul

stainless steel hasil pengondisian ZRTTD yang sudah dilakukan sampai dengan September 2016 di PTLR-BATAN.

Tabel 1. Data kapsul *stainless steel* hasil pengondisian ZRTTD di PTLR-BATAN

No.	Kode Kapsul S.S	Radionuklida	D _{value} (Ci)	Jumlah Sumber	Aktivitas, A (Ci)
1	C-01	Co-60	0,81	61	0,03
2	C-02	Cs-137	2,70	36	7,44
3	C-03	Cs-137	2,70	9	0,05
4	C-04	Am-241/Be	1,62	10	0,36
5	C-05	Co-60	0,81	80	0,21
6	C-06	Co-60	0,81	30	0,08
7	C-07	Cs-137	2,70	36	4,55
8	C-09	Cs-137	2,70	20	1,98

Dari Tabel 1, dapat diketahui aktivitas total dari masing-masing radionuklida adalah Co-60 sebesar 0,33 Ci; Cs-137 sebesar 14,01 Ci; dan Am-241/Be sebesar 0,36 Ci. Seluruh kapsul *stainless steel* yang berisi sumber-sumber radioaktif pada Tabel 1 tersebut akan dimasukkan ke dalam 1 (satu) drum *stainless steel* ukuran 60 l, dan selanjutnya disimpan di sumuran PSLAT. Dengan demikian *aggregate A/D* dapat dihitung :

$$\begin{aligned}
 &= (0,03 + 0,21 + 0,08)/0,81 + (7,44 + 0,05 + 4,55 + 1,98)/2,70 + (0,36)/1,62 \\
 &= 0,4 + 5,19 + 0,22 \\
 &= 5,81
 \end{aligned}$$

Dengan demikian bungkusannya berupa drum *stainless steel* 60 l akan memiliki *aggregate A/D* = 5,81 termasuk kategori 3 ($10 > A/D \geq 1$). Gambar 3 dan 4 menunjukkan drum *stainless steel* 60 l yang akan digunakan untuk menyimpan kapsul-kapsul *stainless steel* hasil pengondisian ZRTTD kategori 3 – 5.



Gambar 3. Tampak atas dan tampak samping drum *stainless steel* 60 l



Gambar 4. Sistem magnetik pada tutup drum *stainless steel* 60 l

Sumuran PSLAT memiliki kedalaman 4 m. Sedangkan penutup sumuran terbuat dari beton setebal 33 cm dan dilapisi timbal (Pb) setebal 5 cm. Dalam perhitungan menggunakan *software MicroShield Version 7.02* kedalaman sumuran dan dimensi penutupnya akan berfungsi sebagai *shielding* radiasi dalam arah vertikal menuju permukaan sumuran. Tabel 2 berikut ini adalah hasil perhitungan laju dosis radiasi pada permukaan sumuran PSLAT menggunakan *software MicroShield Version 7.02* dengan

sumber radiasi kapsul-kapsul *stainless steel* 60 l pada data Tabel 1.

Tabel 2. Hasil perhitungan laju dosis radiasi pada permukaan sumuran PSLAT menggunakan *software MicroShield Version 7.02*.

MicroShield 7.02 Toshiba (08-MSD-7.02-1527)			
Date	By	Checked	
August 4, 2017	Suhartono	Husen Zamroni	
Filename	Run Date	Run Time	Duration
Kapsul Kondisioning Dalam Sumuran PSLAT	August 4, 2017	3:05:20 PM	00:00:00
Project Info			
Case Title	Seluruh Kapsul Sumber Dalam satu Drum SS 60 L		
Description	Kapsul SS Hasil Expert Mission dan Fellowship		
Geometry	1 - Point		

Source Input: Grouping Method - Actual Photon Energies					
Nuclide	Ci	Bq			
Am-241	3.6000e-001	1.3320e+010			
Ba-137m	1.3253e+001	4.9038e+011			
Co-60	3.3000e-001	1.2210e+010			
Cs-137	1.4010e+001	5.1837e+011			
Buildup: The material reference is Shield 1 Integration Parameters					
Results					
Energy (MeV)	Activity (Photons/sec)	Fluence Rate MeV/cm²/sec No Buildup	Fluence Rate MeV/cm²/sec With Buildup	Exposure Rate mR/hr No Buildup	Exposure Rate mR/hr With Buildup
0.0045	5.091e+09	0.000e+00	1.846e-25	0.000e+00	1.265e-25
0.0139	5.688e+09	0.000e+00	6.412e-25	0.000e+00	6.989e-26

0.0263	3.197e+08	0.000e+00	7.647e-25	0.000e+00	1.123e-26
0.0318	1.015e+10	0.000e+00	1.017e-22	0.000e+00	8.473e-25
0.0322	1.873e+10	0.000e+00	2.041e-22	0.000e+00	1.642e-24
0.0332	1.412e+07	0.000e+00	1.915e-25	0.000e+00	1.409e-27
0.0364	6.816e+09	0.000e+00	1.809e-22	0.000e+00	1.028e-24
0.0595	4.782e+09	1.202e-122	1.162e-20	2.412e-125	2.330e-23
0.0692	2.389e+07	9.461e-86	1.886e-22	1.625e-88	3.239e-25
0.6616	4.412e+11	9.381e-01	5.402e+01	1.819e-03	1.047e-01
0.6938	1.992e+06	6.930e-06	3.506e-04	1.338e-08	6.769e-07
1.1732	1.221e+10	2.421e+00	3.871e+01	4.327e-03	6.918e-02
1.3325	1.221e+10	4.925e+00	6.317e+01	8.544e-03	1.096e-01
Totals	5.173e+11	8.284e+00	1.559e+02	1.469e-02	2.835e-01

Berdasarkan data pada Tabel 2 tampak bahwa jika 8 (delapan) buah kapsul *stainless steel* hasil pengondisian ZRTTD (data aktivitas pada Tabel 1) disimpan di dasar sumuran PSLAT dan ditutup dengan penutup sumuran, maka akan memberikan laju dosis radiasi sebesar 0,284 mR/jam ($\approx 2,84 \mu\text{Sv/jam}$) pada permukaan sumuran. Nilai laju dosis radiasi sebesar 2,84 $\mu\text{Sv/jam}$ ini masih di bawah batasan laju dosis radiasi pada ruangan tersebut yang telah ditetapkan sebesar 25 $\mu\text{Sv/jam}$ ^[5]. Nilai laju dosis radiasi ke arah horizontal dari sumuran tidak menjadi hal yang mengkhawatirkan karena struktur beton dinding sumuran dan tanah sekitarnya akan berfungsi sebagai penahan radiasi yang efektif. Potensi kontaminasi radioaktif pada sumuran dan tanah sekitarnya relatif kecil karena sumber radioaktif yang disimpan berupa sumber-sumber radioaktif terbungkus bekas yang dikemas dalam kapsul dengan integritas tinggi. Potensi kerusakan sumber radioaktif terbungkus, kapsul-kapsul, dan drum penyimpanannya akibat pengaruh lingkungan (suhu dan kelembaban) diminimalisir dengan penggunaan bahan *stainless steel* dan dinding-dinding sumuran terbuat dari beton dengan ketebalan 10 cm.

Penempatan kapsul-kapsul *stainless steel* hasil pengondisian ZRTTD kategori 3 – 5 di dalam sumuran PSLAT juga dapat digunakan sebagai fungsi penundaan dalam upaya keamanan sumber radioaktif^[6]. Diperlukan sistem peralatan tertentu dan keterampilan operator untuk membuka/menutup tutup sumuran dan memasukkan/mengeluarkan drum *stainless steel* dalam sumuran. Ditambah dengan kendali akses kunci, akan menjamin keamanan penyimpanan sumber-sumber radioaktif dari

kemungkinan sabotase, pencurian, dan atau bahaya kebakaran.

KESIMPULAN

Kapsul-kapsul *stainless steel* hasil pengondisian ZRTTD kategori 3 – 5 dapat disimpan di dalam fasilitas sumuran PSLAT dengan selamat dan aman. Perhitungan menggunakan *software MicroShield Version 7.02* menunjukkan bahwa sumber-sumber radioaktif terbungkus bekas yang terdiri dari campuran radionuklida Co-60 dengan aktivitas 0,33 Ci; Cs-137 14,01 Ci; dan Am-241 0,36 Ci yang disimpan di dasar sumuran hanya akan memberikan laju dosis radiasi sebesar 2,84 $\mu\text{Sv/jam}$ pada kontak permukaan sumuran bagian atas. Nilai laju dosis radiasi sebesar 2,84 $\mu\text{Sv/jam}$ ini masih di bawah batasan laju dosis radiasi pada ruangan tersebut yang telah ditetapkan sebesar 25 $\mu\text{Sv/jam}$. Penyebaran kontaminasi zat radioaktif pada sumuran PSLAT dan struktur tanah di sekitarnya tidak akan terjadi karena zat radioaktif terkungkung secara kuat dalam pembungkus dari bahan *stainless steel* dan selanjutnya dimasukkan ke dalam kapsul dan drum ukuran 60 l yang terbuat dari bahan *stainless steel* juga. Penyimpanan kapsul-kapsul *stainless steel* hasil pengondisian ZRTTD kategori 3 – 5 di dalam sumuran PSLAT juga dapat memberikan jaminan keamanan sumber radioaktif yang lebih baik. Karena sumuran PSLAT dapat digunakan sebagai fungsi penundaan yang handal dalam upaya keamanan sumber radioaktif.

DAFTAR PUSTAKA

1. Wasito, Dasar Perencanaan Penyimpanan Sementara Limbah Aktivitas Tinggi (PSLAT) Sistem Sumuran, PTLR-BATAN, (1994).
2. Pemerintah Republik Indonesia, Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 61 Tahun 2013 tentang Pengelolaan Limbah Radioaktif, (2013).
3. IAEA, *IAEA-TECDOC-1690 Review of Sealed Source Designs and Manufacturing Techniques Affecting Disused Source Management*, (2012) 2 – 20.
4. IAEA, *IAEA Safety Standards Series No. RS-G-1.9 Categorization of Radioactive Sources*, (2005) 4 – 33.
5. PTLR-BATAN, *Program Proteksi dan Keselamatan Radiasi Instalasi Pengolahan Limbah Radioaktif (IPLR)* PTLR – BATAN, (2017).
6. BAPETEN, Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 6 Tahun 2015 Tentang Keamanan Sumber Radioaktif, BAPETEN, (2015).

Jawaban :

- 1) Diperkirakan tiap sumuran dapat menyimpan 28-35 kapsul SS yang diameter 5 cm dan tinggi 12,5 cm.
- 2) Kedalaman sumuran didisain dengan memperhitungkan :
 - a. tingkat radiasi daerah kerja yang ingin dicapai
 - b. tinggi permukaan air tanah lokasi PSLAT
- 3) SS 304.

Tanya Jawab

Penanya : Hendro Wahyono.

Pertanyaan :

- 1) Berapa kapasitas sumur untuk dapat menyimpan kapsul-kapsul tersebut ?
- 2) Bagaimana pengaruh serapan radiasi terhadap tanah ?

Jawaban :

- 1) Berdasarkan desain, tiap sumuran PSLAT dirancang dapat menyimpan limbah radioaktif dengan aktivitas total 2600 Ci (dengan asumsi radionuklida Co-60)
- 2) Dinding sumuran dilapisi dengan beton setebal 10 cm dengan berat jenis $\pm 3,0 - 3,4$ g/cm².

Penanya : Sunardi

Pertanyaan :

- 1) Berapa jumlah maksimal kapsul SS diameter 5 cm tinggi 12,5 cm yang didalamnya berisi ZRTTD yang dapat dimasukkan. ?
- 2) Dimensi sumuran PSLAT (kedalaman) atau desain mengacu pada standard apa?
- 3) Bahan SS berapa yang dipakai ?

KAJIAN ANALISIS PERTUMBUHAN BAKTERI PENYEBAB BIO-KOROSI DI KOLAM PENYIMPANAN BAHAN BAKAR NUKLIR BEKAS

Dyah Sulistyani Rahayu, Marhaeni Joko Puspito
Pusat Teknologi Limbah Radioaktif – BATAN
yayuk@batan.go.id

ABSTRAK

KAJIAN ANALISIS PERTUMBUHAN BAKTERI PENYEBAB BIO-KOROSI DI KOLAM PENYIMPANAN BAHAN BAKAR NUKLIR BEKAS (BBNB). Kolam penyimpanan BBNB adalah fasilitas vital yang sangat penting dijaga kondisi kualitas airnya sesuai Batas Kondisi Operasi (BKO), untuk menghindari terjadinya proses korosi. Sebagai langkah awal dilakukan kajian untuk menganalisa pertumbuhan bakteri penyebab korosi, dan indikasi keberadaan bakteri APB tersebut di kolam penyimpanan BBNB. Dampak mikroba terhadap korosi cukup penting, maka tidak bisa diabaikan dan memerlukan kajian yang lebih intensif sehingga pengaruh korosi dapat diminimalisir. Penelitian dilakukan dengan mengambil 10 titik sampling pada air kolam dan kanal, yaitu 7 titik pada kolam dan 3 titik pada kanal, kemudian diinokulasikan kedalam agar tube dan disimpan dalam inkubator selama 1- 5 hari pada suhu 30°C. Pengamatan secara visual perubahan warna dari merah ke kuning, dimulai hari pertama sampai hari kelima. Dari hasil analisa dengan menggunakan sanicheck APB terdeteksi adanya bakteri produksi asam penyebab korosi (APB) yang kuat dengan perkiraan populasi 90.000 cfu/ mL di dekat rak BBNB serta dan 3 titik di kanal hubung penyimpanan BBNB, sedangkan di titik sampling yang lain terdeteksi populasi bakteri sangat lemah. Hal tersebut dikarenakan pada area tersebut aliran airnya sangat kecil cenderung lebih tenang dibanding dengan lokasi yang lain, disebabkan lokasi pipa untuk sirkulasi air kolam yang jauh dari titik tersebut

Kata kunci : bakteri produksi asam, bio-korosi, kolam penyimpanan bahan bakar bekas .

ABSTRACT

STUDY ON GROWTH ANALYSIS OF BACTERIAL CAUSES OF BIO-CORROSION IN THE SPENT NUCLEAR FUEL STORAGE. Spent nuclear fuel storage pool is a vital facility that is very important to maintain the condition of water quality according to Boundary Operation Condition (BKO), to avoid the occurrence of corrosion process. The next step is to analyze the growth of corrosion-causing bacteria, and the APB bacteria in the spent fuel storage pool. The impact of microbe on corrosion is quite important, it cannot be ignored and requires a more intensive study so as to influence corrosion can be minimized. Research by taking 10 sampling points on pond water and canals, 7 points on the pond and 3 points on the channel then inoculated into tube And stored in an incubator for 1- 5 days at a temperature of 30°C. Visually observed changes in color from red to yellow, starting the first day until the fifth day. From the analysis result by sanicheck APB detected the presence of strong corrosive acid production (APB) with the with the estimated population of 90,000 cfu /mL in pool and channel of spent nuclear fuel storage, while at other sampling points was weak., because that area very small water flow tend to be quieter than the other location, due to the location of the pipeline for the water circulation pond far from that point, so it is necessary to re-install the circulation pipe so that the water flow is more homogeneous.

Keywords: acid production bacteria, bio-corrosion, spent fuel storage pool

PENDAHULUAN

Fungsi kolam penyimpanan bahan bakar nuklir bekas di Kanal Hubung Instalasi Penyimpanan Sementara Bahan Bakar Nuklir Bekas (BBNB) adalah untuk menyimpan bahan bakar nuklir bekas yang berasal dari PRSG dan material teriradiasi yang lain. Semua bahan nuklir yang disimpan di kolam penyimpanan dengan ukuran 4 x 15 meter. Bahan bakar nuklir bekas dan dimasukkan ke dalam rak yang terbuat dari *stainless steel* dengan ukuran 0,94m x 0,94m [1]. Kolam penyimpan BBNB berisi kira-kira 995 m³ air bebas mineral, 6 buah rak SS yang berisi 245 BBNB serta 1 buah rak penyimpan scrab material. Fasilitas IPSB3 dirancang untuk dapat menampung 1448 BBNB yang ditimbulkan dari 25 tahun operasi RSG-GAS. Air bebas mineral dipasok dari sistem demineralisasi

menggunakan kolom penukar anion dan kation. Sistem purifikasi dilakukan untuk mempertahankan kualitas air di KHPSB3 dari kontaminasi zat radioaktif serta untuk proses sirkulasi dan pemurnian air secara kontinu. Persyaratan kualitas air kolam KHPSB3 sesuai dengan Batas Kondisi Operasi (BKO) seperti ditunjukkan pada Tabel 1. Salah satu parameter untuk mengontrol kualitas air tersebut adalah parameter biologi, yaitu kandungan mikroba seperti bakteri, jamur, algae dan lain sebagainya. Akumulasi dari campuran mikroorganisme ini membentuk *slime*, yang menempel pada rak, alat *handling* BBNB, dinding SS kolam penyimpanan BBNB serta pipa-pipa yang berada pada kolam dan kanal.

Tabel 1. Kualitas air bebas mineral dari sistem demineralisasi [1]

pH	: 6,0 – 7,7	Cl	: 0,2 mol/cm ³
Konduktivitas	: < 15 S/cm	SO ₄	: 0,6 mol/m ³
Total kandungan garam	: 100 mg/l	Fe total	: 0 %
CaO	: 0,6 mol/m ³	asam salisilat	: 0,34 mol/m ³

Dampak pengotoran air oleh mikroba secara langsung belum diketahui, tetapi mempengaruhi proses korosi yang dikenal dengan istilah MIC (*Microbiological influenced Corrosion*) [2]. Bio-korosi merupakan korosi yang disebabkan oleh mikro organisme dapat berupa bakteri, jamur atau alga. Dalam *bio-korosi*, mikroorganisme dapat berperan secara aktif maupun secara pasif dalam menyebabkan korosi. Korosi terhadap degradasi material di lingkungan, pengaruh inisiasi atau laju korosi di suatu area, mikroorganisme umumnya berhubungan dengan permukaan korosi kemudian menempel pada permukaan logam dalam bentuk lapisan tipis atau biodeposit. Lapisan film atau biofilm berupa biodeposit biasanya membentuk diameter beberapa centimeter di permukaan, namun terekspos sedikit di permukaan sehingga dapat menyebabkan korosi lokal. [3]

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui keberadaan atau pertumbuhan MIC dalam hal ini adalah bakteri penghasil asam (APB). Hal ini sangat penting dilakukan karena faktor korosi adalah hal yang sangat dihindarkan dari kolam penyimpanan BBNB. Apabila BBNB terkorosi terjadi pitting corrosion maka akan mengakibatkan lepasan radionuklida hasil fisi ke air pendingin reaktor dan udara lingkungan. Dampak mikroba terhadap korosi cukup penting, maka tidak bisa diabaikan dan memerlukan kajian yang lebih intensif sehingga pengaruh korosi dapat diminimalisir. Sebagai langkah awal dilakukan kajian untuk menganalisa pertumbuhan bakteri penyebab korosi, salah satunya adalah *Acid Production Bacteri* (APB), dan indikasi keberadaan bakteri APB tersebut di kolam penyimpanan BBNB.

TEORI

Mikroorganisme dikategorikan berdasarkan kadar oksigen yaitu [3]:

1. Jenis anaerob, berkembang biak pada kondisi tidak adanya oksigen
2. Jenis Aerob, berkembang biak pada kondisi kaya oksigen.
3. Jenis anaerob fakultatif, berkembang biak pada dua kondisi.

Jenis-jenis bakteri yang berkembang, yaitu [3]:

1. Bakteri reduksi sulfat. Bakteri ini merupakan bakteri jenis anaerob membutuhkan lingkungan bebas oksigen atau lingkungan

reduksi, bakteri ini bersirkulasi di dalam air aerasi termasuk larutan klorin dan oksidiser lainnya, hingga mencapai kondisi ideal untuk mendukung metabolisme. Bakteri ini tumbuh pada oksigen rendah. Bakteri ini tumbuh pada daerah-daerah kanal, pelabuhan, daerah air tenang tergantung pada lingkungannya. Bakteri ini mereduksi sulfat menjadi sulfid, biasanya terlihat dari meningkatnya kadar H₂S atau Besi sulfida. Tidak adanya sulfat, beberapa turunan dapat berfungsi sebagai fermenter menggunakan campuran organik seperti pyruvate untuk memproduksi asetat, hidrogen dan CO₂, banyak bakteri jenis ini berisi enzim hidrogenase yang mengkonsumsi hidrogen.

2. Bakteri oksidasi sulfur-sulfida (bakteri Thiobacillus). Bakteri jenis ini merupakan bakteri aerob yang mendapatkan energi dari oksidasi sulfid atau sulfur. Beberapa tipe bakteri aerob dapat teroksidasi sulfur menjadi asam sulfurik.
3. Bakteri besi mangan oksida Bakteri memperoleh energi dari oksidasi Fe²⁺(2+) atau Fe³⁺(3+) dimana deposit berhubungan dengan bakteri korosi. Bakteri ini hampir selalu ditemukan di *Tubercle* (gundukan Hemispherikal berlainan) di atas lubang pit pada permukaan baja.

Masalah biokorosi di dalam suatu sistem lingkungan mempunyai beberapa variable yaitu [4]:

1. Temperatur, umumnya kenaikan suhu dapat meningkatkan laju korosi tergantung karakteristik mikroorganisme yang mempunyai suhu optimum untuk tumbuh yang berlainan.
2. Kecepatan alir, jika kecepatan alir biofilm rendah akan mudah terganggu sedangkan kecepatan alir tinggi menyebabkan lapisan lebih tipis dan padat.
3. pH, umumnya pH air dapat mempengaruhi metabolisme mikroorganisme.
4. Kadar Oksigen, banyak bakteri membutuhkan O₂ untuk tumbuh, namun pada Organisme fakultatif jika O₂ berkurang maka dengan cepat bakteri ini mengubah metabolismenya menjadi bakteri anaerob.
5. Kebersihan, dimaksud air yang kadar endapan padatan rendah, padatan ini

menciptakan keadaan di permukaan untuk tumbuhnya aktifitas mikroba.

Bio-korosi aktif dapat disebabkan baik oleh bakteri aerob ataupun anaerob, beberapa tipe bakteri yang menyebabkan bio-korosi antara lain pereduksi sulfat, memproduksi asam, pendeposit logam, *slime formers*. Beberapa bakteri pereduksi sulfat yang dikenal antara lain *desulfovibrio*, *desulfomonas*, *desulfotomaculun*, umumnya bakteri pereduksi sulfat merupakan bakteri anerob, bakteri pereduksi sulfat memiliki ketahanan baik pada temperatur sampai dengan 80 C, bakteri ini bekerja baik pada pH 5-9. *Thiobacillus Thiooxidans* dan *clostridia* merupakan bakteri penghasil asam, bakteri *Thiobacillus Thiooxidans* mengoksidasi senyawa sulfur menjadi sulfat, *Thiobacillus Thiooxidans* merupakan bakteri yang bersifat aerob, sementara *clostridia* bersifat anaerob, dan *clostridia* menghasilkan asam organik rantai pendek. *Gallionella* merupakan bakteri yang mampu mengoksidasi ion ferro Fe^{+2} ke ion ferri Fe^{+3} , *Gallionella* umumnya berdeposit bersama ion besi, mangan yang mengandung ion klorida, bakteri *Gallionella* sering ditemukan pada sambungan las, beberapa bakteri pengoksidasi besi lain yang dikenal antara lain *sphaerotilus*, *crenothrix* dan *leptothrix*, *Pseudomonas* merupakan bakteri slime formers, lapisan slim merupakan polymer extraselular hasil metabolisme, lapisan slim dari bakteri slim former berkontribusi pada timbulnya korosi yang disebabkan adanya sel konsentrasi. Jenis-jenis bakteri penyebab korosi terlihat pada Tabel 2 dan 3.

Acid Production Bacteri (APB) atau bakteri produksi asam sebagai penyebab utama korosi, terutama karena aktivitas fermentasi mereka akan menyebabkan penurunan pH ke kondisi asam, terutama di biofilm. Dengan kondisi seperti ini, suatu bentuk asam yang disebabkan korosi dapat terjadi, di mana logam mulai larut dan struktur beton kehilangan integritas. Bentuk asam korosi ini dapat dipandang sebagai kejadian awal atau alternatif untuk korosi elektrolitik yang diawali oleh Bakteri Pereduksi Sulfat (SRB). Bakteri pereduksi sulfat (SRB) karena kaitannya yang jelas dengan produksi hidrogen sulfida, yang dikenal sebagai inisiator korosi elektrolitik pada besi [5]. Kondisi pertumbuhan SRB umumnya melibatkan kondisi reduktif dan suplai asetat, salah satu asam lemak terminal yang biasa diproduksi oleh fermentasi mikroba. Asam lemak ini adalah produk umum dari fermentasi mikroba reduktif dan dapat

menyebabkan pH lingkungan turun ke kisaran asam. Bakteri fermentasi yang mampu melakukan ini adalah bakteri penghasil asam (APB). Intinya, APB dapat dipandang sebagai pengaturan kondisi untuk meningkatkan tingkat agresivitas SRB, dengan memanfaatkan asam lemak yang dihasilkan oleh APB [5].

Tabel 2. Bakteri Aerobik Penyebab Korosi^[4]

Genus atau Spesies	Range pH	Range Suhu °C	Logam yang Dapat Terkorosi	Aksi Korosif
<i>Thiobacillus thiooxidans</i>	0.5-8	10-40	Besi dan baja, paduan tembaga	Mengoksidasi sulfur dan sulfida menjadi H ₂ SO ₄ .
<i>Thiobacillus ferrooxidans</i>	1-7	10-40	Besi dan baja	Mengoksidasi Fe ²⁺ menjadi Fe ³⁺
<i>Gallionella</i>	7-10	20-40	Besi dan baja, <i>stainless steel</i>	Mengoksidasi Fe ²⁺ dan Mn ²⁺ menjadi Fe ³⁺ dan Mn ³⁺
<i>Sphaerotilus</i>	7-10	20-40	Besi dan baja, <i>stainless steel</i>	Mengoksidasi Fe ²⁺ dan Mn ²⁺ menjadi Fe ³⁺ dan Mn ³⁺
<i>Pseudomonas</i>	4-9	20-40	Besi dan baja, <i>stainless steel</i>	Mereduksi Fe ³⁺ menjadi Fe ²⁺
<i>P. aeruginosa</i>	4-8	20-40	Paduan aluminium	...

Tabel 3. Bakteri Anaerobik Penyebab Korosi^[4]

Genus atau Spesies	Range pH	Range Suhu °C	Logam yang Dapat Terkorosi	Aksi Korosif
<i>Desulfovibrio desulfuricans</i>	4-8	10-40	Besi dan baja, <i>stainless steel</i> , aluminium seng, paduan tembaga	Memanfaatkan hidrogen dalam mereduksi SO ₄ ²⁻ menjadi S ²⁻ dan H ₂ S
<i>Desulfotomaculum nigrificans</i>	6-8	10-40 dan 45-75	Besi dan baja, <i>stainless steel</i>	Mereduksi SO ₄ ²⁻ menjadi S ²⁻ dan H ₂ S
<i>Desulfomonas</i>	...	10-40	Besi dan baja	Mereduksi SO ₄ ²⁻ menjadi S ²⁻ dan H ₂ S

METODOLOGI

BAHAN :

- Sanicheck APB
- Air kolam KHIPSB3

TATA KERJA

Pengambilan air sampling 10 titik sampling. Lokasi titik sampling di 6 titik di sekitar rak BBNB, 1 titik di sekitar *scrap*, 1 titik didekat slice gate, 1 titik di gate kanal hubung arah RSG, 1 titik di gate kanal arah PT INUKI, dan 1 titik di gate kanal arah RMI (*Radiometalurgi Instalation*) dan dimasukkan kedalam botol

sampling. Membuka agar *tube* dan *sampel applicator* dari pembungkusnya dan memasukan *sampel applicator* kedalam air sampel sekitar 10 detik. Memasukan *sampel applicator* ke agar *tube* dengan pelan dan hati – hati, kemudian menutup kembali agar *tube*. Meletakkan sampel-sampel kedalam inkubator selama 1 – 5 hari dengan suhu 30⁰C dan mengamati perubahan warna dari merah (warna asal) ke warna kuning mulai hari ke 1 sampai hari ke 5.

Indikator adanya bakteri ditandai dengan perubahan seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

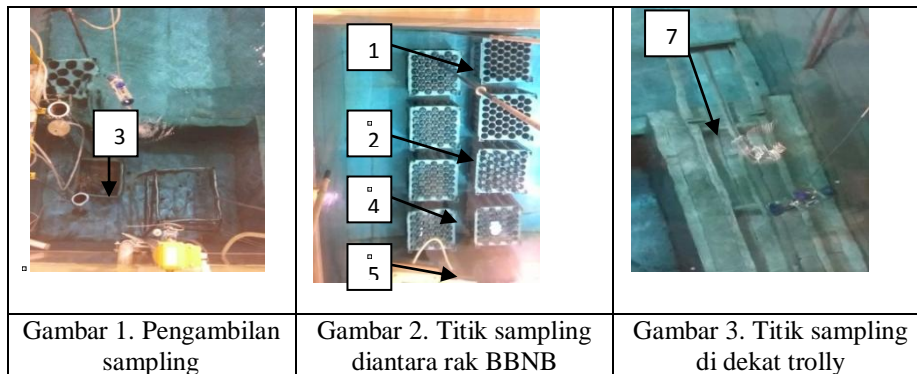
Tabel 1. Indikator perubahan warna dan agresivitas bakteri

Perubahan warna menjadi kuning (Appearance of yellow)	Perkiraan populasi APB cfu/mL	Agresivitas Bakteri Produksi Asam
Hari ke 1	250.000	Kuat
Hari ke 2	90.000	Kuat
Hari ke 3	1500	Medium
Hari ke 4	150	Medium
Hari 5	< 100	Lemah

HASIL DAN PEMBAHASAN

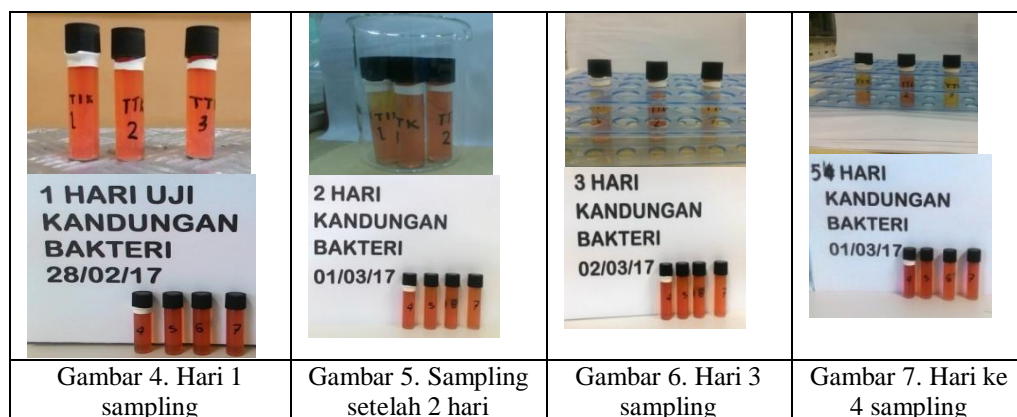
Hasil uji analisa mikrobiologi di lokasi dekat dengan rak BBNB, rak scrab dan dekat sluice gate yaitu titik sampling no. 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 dan pengamatan titik sampling no. 8, 9 dan 10 kanal

yaitu pada gate kanal arah PRSG, PT INUKI dan RMI ditunjukkan pada Grafik 1. Penentuan lokasi titik sampling seperti terlihat pada Gambar 1, 2, 3.



Hasil uji analisis biologi

1. Lokasi di dekat rak bahan bakar nuklir bekas

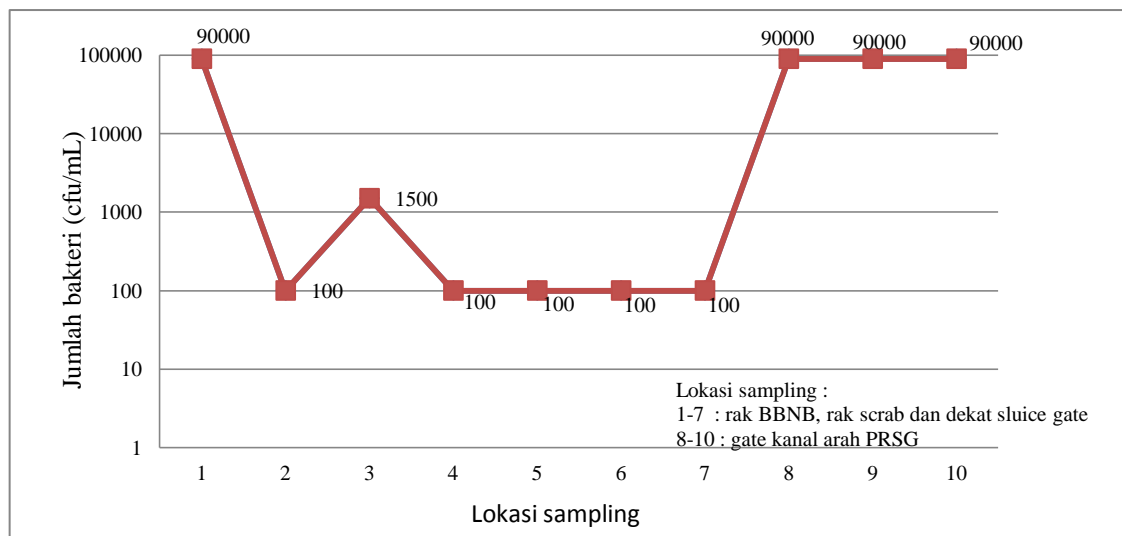


2.. Lokasi di gate kanal hubung



Gambar 8. Sampling hari ke 1

Gambar 9. Sampling hari ke 2



Gambar 10. Lokasi sampling vs jumlah bakteri (cfu/mL)

Dari grafik 10 terlihat di beberapa titik tertentu memang keberadaan pertumbuhan koloni APB sangat kuat, seperti pada titik 1 dekat rak BBNB. Hal tersebut disebabkan karena pada area tersebut aliran airnya sangat kecil cenderung lebih tenang dibanding dengan lokasi yang lain, disebabkan karena lokasi pipa untuk sirkulasi air kolam yang jauh dari titik tersebut. Hal ini sangat penting untuk diwaspadai karena koloni bakteri dekat dengan BBNB yang rentan dengan korosi. Apabila korosi maka dikawatirkan akan terlepasnya hasil fisi yang sangat tidak diharapkan. Demikian juga pada titik sampling no. 8, 9, 10 yaitu lokasi di gate kanal menuju RSG, PT INUKI dan RMI. Pada titik lokasi tersebut pipa sirkulasi dari kanal juga jauh dari titik lokasi tersebut, sehingga aliran airnya sangat kecil cenderung lebih tenang dibanding dengan lokasi yang lain. Batas kondisi operasi (BKO) untuk mempertahankan kualitas air sesuai dengan syarat keselamatan yang telah ditetapkan

adalah suhu 25 – 35 °C , pH = 6,0 - 7,5 dan konduktivitas < 15 µS/cm yang ternyata merupakan kondisi yang sangat baik untuk pertumbuhan populasi bakteri, dimana bakteri APB ,spesies *Thiobactillus thiooxidans* merupakan bakteri aerob, hidup pada kondisi pH 0,5 - 8 dan suhu 10 - 40 °C. Bakteri produksi asam sebagai penyebab utama korosi, terutama karena aktivitas fermentasi mereka akan menyebabkan penurunan pH ke kondisi asam, terutama di biofilm. Dengan kondisi seperti ini, suatu bentuk asam yang disebabkan korosi dapat terjadi, di mana logam mulai larut dan struktur beton kehilangan integritas. Sehingga dari hasil analisa tersebut, menginstal ulang kembali pipa sirkulasi air kolam adalah yang paling mungkin dilakukan sehingga sirkulasi aliran air kolam dan kanal lebih merata dan homogen, untuk menghindari koloni bakteri penyebab korosi yang lebih banyak.

Beberapa cara yang dapat dilakukan untuk pencegahan MIC, yaitu melakukan pembersihan permukaan secara mekanis berkala dan perawatan dengan *biocides* untuk membunuh bakteri atau mikroorganisme, modifikasi material yang digunakan, perubahan sistem aliran/operasi dan penggunaan bahan kimia tetapi hal tersebut tidak mungkin dilakukan karena lokasi penelitian ada di kolam penyimpanan bahan bakar nuklir bekas, yang tidak boleh ditambahkan zat-zat kimia, karena kualitas air kolam yang harus senantiasa dijaga sesuai dengan batas kondisi operasi yang sesuai.

KESIMPULAN

Analisa pertumbuhan populasi bakteri produksi asam (APB) penyebab korosi di dekat rak BBNB dan kanal gate PRSG, PT Inuki dan RMI dengan menggunakan sanicheck APB dan terdeteksi adanya populasi APB yang kuat dengan perkiraan populasi 90.000 cfu/mL di dekat rak BBNB, sedangkan di titik sampling yang lain terdeteksi populasi bakteri sangat lemah. Sedangkan di kanal menunjukkan adanya populasi APB lebih banyak yaitu di gate RSG, RMI dan PT INUKI dengan perkiraan populasi 90.000 cfu/mL. Faktor-faktor penyebab korosi seperti pH, temperatur, laju alir dan kadar oksigen sangat berpengaruh terhadap pertumbuhan bakteri, dalam hal ini terutama laju alir/sirkulasi dari kolam dan kanal yang perlu diperbaiki untuk menghindari koloni bakteri penyebab korosi yang lebih banyak. Hasil penelitian selanjutnya akan dikembangkan untuk mengidentifikasi secara fisiologis dengan kamera mikroskop mengenai populasi bakteri, laju pertumbuhannya dan pemetaan pertumbuhan bakteri di titik lokasi yang lain.

DAFTAR PUSTAKA

1. Laporan Analisis Keselamatan Kanal Hubung Instalasi Penyimpanan Sementara Bahan Bakar Bekas (LAK KH-IPSB3), rev 7, PTLR – BATAN, 2009
2. A.B Johnsons Jr, Behavior Of Spent Nuclear Fuel in Water Pool storage, Sept 1997, Battelle, Pacific Northwest Laboratories Richland, washington, 99352
3. D. Suhartanti, 2006, Laju Korosi Baja oleh *Desulfomicrobium Baculatum* dan *Desulfomonas Pigra*, Universitas Ahmad Dahlan Yogyakarta.
4. G. Priyotomo, Teguh, 2007, Degradasi Fungsi Sistem Industri Akibat Korosi Mikrobiologi, Puslit Metalurgi LIPI.
5. J. Starosvetsky et al, 2007, *Identification of microbiologically influenced corrosion (MIC) in industrial equipment failures*, Elsevier Journal.
6. Jones, Denny A, 1996, *Principles and Prevention of Corrosion*, Prentice Hall

ANALISIS RADIOAKTIVITAS AIR PENDINGIN DI FASILITAS KH-IPSB3

Titik Sundari, Darmawan Aji
Pusat Teknologi Limbah Radioaktif-BATAN
Kawasan PUSPIPTEK Serpong Gedung No.50
E-mail: titik@batan.go.id

ABSTRAK

ANALISIS RADIOAKTIVITAS AIR PENDINGIN DI FASILITAS KH-IPSB3. Saat ini ada 245 bahan bakar nuklir bekas disimpan dengan tipe basah di fasilitas kanal hubung instalasi penyimpanan sementara bahan bakar bekas (KH-IPSB3). Kolam penyimpanan 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 dijaga dengan mengoperasikan sistem purifikasi/pemurnian air dengan resin penukar ion. Pengambilan sampel air pendingin baik di kolam dan kanal dilakukan dengan mengoperasikan sistem purifikasi air kolam dan kanal. Analisis radioaktivitas air kolam dan kanal dilakukan menggunakan spektrometri gamma (*multy channel analyzer*). Dari hasil analisis radioaktivitas air kanal dan kolam didapatkan radionuklida Cs-137 yang mempunyai waktu paro panjang terdapat konsentrasi sebesar konsentrasi $2,00 \times 10^{-7}$ $\mu\text{Ci/ml}$ tapi masih lebih rendah dari Konten Radioaktivitas Tertinggi/LPHRC (7×10^2 Bq/L atau $1,891 \times 10^{-5}$ $\mu\text{Ci/ml}$). Sedangkan untuk radionuklida dengan waktu paro sangat singkat, Sb-124, J-133 dan Ce-143 terdeteksi ada yang masih lebih rendah dari LPHRC tapi ada juga lebih tinggi dari LPHRC (7×10^2 Bq/L atau $1,891 \times 10^{-5}$ $\mu\text{Ci/ml}$). Konsentrasi tertinggi untuk Sb-124 yaitu $5,2 \times 10^{-5}$ $\mu\text{Ci/ml}$, untuk J-133 adalah $6,2 \times 10^{-4}$ $\mu\text{Ci/ml}$, sedangkan untuk Ce-143 adalah $6,60 \times 10^{-5}$ $\mu\text{Ci/ml}$. Kontaminan tersebut selanjutnya dapat ditangkap dengan menggunakan sistem purifikasi/pemurnian air. Hasil analisis tidak menunjukkan adanya kontaminasi dari aktivasi produk korosi seperti Zn-65, Co-60, dan Mn-54. Berdasarkan analisis tingkat kontaminasi dapat disimpulkan juga bahwa pengoperasian fasilitas KH-IPSB3 dalam kondisi baik dan aman sesuai dengan standar keselamatan yang berlaku.

Kata Kunci : analisis radioaktivitas, air pendingin, bahan bakar nuklir bekas, KH-IPSB3,

ABSTRACT

RADIOACTIVITY ANALYSIS OF THE WATER COOLANT TC-ISFSF FACILITIES. Currently, there are 245 spent nuclear fuel stored with wet-type in transfer channel-interim storage for spent fuel (TC-ISFSF) facilities. The storage pool until now only used to temporarily store spent nuclear fuel from GA. Siwabessy Multipurpose Reactor, while the transfer channels used to transfer spent nuclear fuel and other irradiated material from RMI and RPI (PT. Inuki). Ponds and canals filled with water coolant which also serves to hold radionuclides from spent nuclear fuel to avoid detachment of radionuclides into the environment. Water quality is maintained by operating system of purification / water purification with ion exchange resins. Sampling of the water coolant in both the pool and the canal is done by operating the water purification system of ponds and canals. Analysis of the radioactivity of water ponds and canals performed using gamma spectrometry (*Multy channel analyzer*). From the analysis of the radioactivity of water channels and pools obtained radionuclides Cs-137 which is a long lived radionuclide, the concentration was 2.0×10^{-7} $\mu\text{Ci} / \text{ml}$ but still lower than the Limit of Permitted Highest Radioactivity Content / LPHRC (7×10^2 Bq / L or 1.891×10^{-5} $\mu\text{Ci} / \text{ml}$). For radionuclide with a half-life is very short, Sb-124, J-133 and Ce-143 detected are still lower than LPHRC but there are also higher than LPHRC (7×10^2 Bq / L or 1.891×10^{-5} $\mu\text{Ci} / \text{ml}$). The highest concentrations of Sb-124 is 5.2×10^{-5} $\mu\text{Ci} / \text{ml}$, for J-133 is 6.2×10^{-4} $\mu\text{Ci} / \text{ml}$ whereas Ce-143 is 6.6×10^{-5} $\mu\text{Ci/ml}$. The contaminants can then be captured by using a water purification system. The results of the analysis did not show any contamination of the activation of corrosion products such as Zn-65, Co-60 and Mn-54. Based on the evaluation and analysis of the level of contamination can be inferred that the TC-ISFSF operation of the facility in good condition and safely in accordance with safety standards.

Keywords: radioactivity analysis, water coolant, spent nuclear fuel, TC-ISFSF.

PENDAHULUAN

Kanal Hubung-Instalasi Penyimpanan Sementara Bahan Bakar Nuklir Bekas (KH-IPSB3) memiliki fungsi utama sebagai tempat penyimpanan sementara Bahan Bakar Nuklir Bekas (BBNB) dari Reaktor Serba Guna GA. Siwabessy (RSG-G.A.S). Ruang penyimpanan BBNB berupa kolam yang berisi air bebas mineral yang berfungsi sebagai pendingin,

perisai radiasi, juga sebagai penahan radionuklida agar tidak lepas ke lingkungan. Untuk menjamin kandungan radionuklida air kolam dalam batas yang diijinkan, dilakukan pemurnian air kolam dengan mengintegrasikan sistem purifikasi dengan air kolam. Dengan dilakukan proses pemurnian air kolam maupun air kanal diharapkan seluruh pengotor dalam air kolam dan kanal dapat tertangkap dalam resin

sistem purifikasi, terutama zat radioaktif yang terkandung di dalam air kolam dan kanal.

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. 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: 14 m x 5 m x (-6,5 m), dan berisi air pendingin sedalam 6,3 m. Kapasitas kolam penyimpanan ini mampu menyimpan 1458 BBNB [1].

KH-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 U₃O₈-Al dan bahan bakar

silisida U₃Si₂ - 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 KH-IPSB3 [4]. 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 [5]:

- a. Kapasitas Maksimal BBNB yang dapat didinginkan (kapasitas penuh) yaitu 1458 bundel;
- b. Tinggi permukaan air kolam pada kapasitas penuh minimal 3,6 dari permukaan BBNB;
- c. Temperatur kolam penyimpanan maksimal sebesar 35 °C;
- d. pH berkisar 5,5 – 7,5 ;
- e. Konduktivitas air lebih kecil daripada 15 µS/cm;
- f. Kontaminasi udara lebih kecil daripada 5,3.10² Bq/m³.

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 [1].

Unsur radioaktif hasil reaksi pembelahan meliputi semua nuklida hasil reaksi pembelahan dan nuklida yang dihasilkan dari penangkapan neutron oleh nuklida hasil pembelahan. Reaksi fisi (pembelahan) secara umum mengikuti persamaan 1 sebagai berikut [6] :



Di mana : Z = nomor atom, A = Nomor massa, L dan H berturut-turut adalah nuklida ringan dan nuklida berat hasil pembelahan. Nuklida ringan mempunyai nomor massa 72 sampai 118 dan nuklida berat bernomor massa 118 sampai 162. X adalah jumlah neutron yang dihasilkan dari reaksi fisi.

Ada sekitar 200 unsur hasil fisi dalam rentang unsur radioaktif dengan nomor atom 30 - 65 dengan nomor massa 72 - 166. Dari 200 unsur hasil fisi tersebut ada 18 unsur hasil fisi utama yang mempunyai *yield* lebih dari 1 % seperti ditunjukkan pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Unsur-Unsur Hasil Fisi Utama yang Mempunyai *Yield* Lebih dari 1% [7,8]

Hasil fisi	Umur paro	Yield (%)	Hasil Fisi	Umur paro	Yield (%)
⁹⁹ Tc	2,1x10 ⁵ tahun	6,0	⁸⁹ Sr	53,0 hari	4,8
¹³⁷ Cs	33 tahun	6,2	¹⁰³ Ru	39,8 hari	3,0
⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y*	28 tahun / 64 jam	5,8	¹⁴¹ Ce	33,1 hari	6,0
⁸⁵ Kr	10 tahun	1,5	¹⁴³ Pr	13,7 hari	6,2
¹⁴⁷ Pm	2,65 tahun	2,7	¹⁴⁰ Ba	12,8 hari	6,3
¹⁴⁴ Ce	282 hari	6,1	¹⁴⁷ Nd	11,3 hari	2,6
⁹⁵ Zr/ ⁹⁵ Nb*	65/35 hari	6,4	¹³¹ I	8,1 hari	2,9
⁹¹ Y	61 hari	5,4	¹³³ Xe	5,3 hari	6,5

*Nuklida induk dan nuklida anak luruhnya (nuklida induk pemancar beta)

Unsur hasil fisi Cs-137 dan Sr-37 dapat mendifusi melewati pori kelongsong bahan bakar masuk ke air pendingin, sehingga terdapat unsur radioaktif Cs-137 dan Sr-90 dalam air pendingin. Unsur radioaktif hasil fisi yang berupa gas seperti : Xe-133, I-131, Kr-85, Kr-87, Kr-88, dan H-3 dapat juga mendifusi melewati pori kelongsong bahan bakar dan masuk ke air pendingin [9].

Ruang lingkup kegiatan ini meliputi analisis jenis dan konsentrasi radionuklida dalam sampel air kanal dan kolam KH-IPSB3, dan evaluasi terhadap nilai batas konsentrasi radionuklida yang diijinkan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui jenis dan konsentrasi radionuklida yang terkandung dalam air kanal dan kolam KH-IPSB3 sehingga dapat menjadi database kualitas air KH-IPSB3 serta menentukan langkah selanjutnya dalam pengelolaan instalasi KH-IPSB3.

METODOLOGI

Peralatan dan bahan

Peralatan yang digunakan dalam analisis radionuklida dalam air pendingin adalah alat spektrometri gamma dan sistem sampling air kolam dan kanal KH-IPSB3 yang berupa saluran pemipaan dan valve.

Bahan yang digunakan dalam analisis radionuklida dalam air pendingin yaitu:

1. Botol Sampel volume 500 mL
2. Nitrogen cair untuk keperluan analisis.
3. Gas Nitrogen untuk keperluan analisis.

Metode

1. Pengambilan Sampel Air Kolam

Sampel air kolam diambil sebanyak 500 mL dari valve keluaran dari pompa P3 pada saat sistem purifikasi dioperasikan pada Mode 2 yaitu sirkulasi dari kolam kembali ke

kolam melalui *Cesium Filter* dan *Mixed bed Filter*.

2. Pengambilan Sampel Air Kanal

Sampel air kanal diambil sebanyak 500 mL dari valve keluaran dari pompa pada saat sistem purifikasi dioperasikan pada Mode 5 yaitu sirkulasi dari kanal penghubung kembali ke kanal penghubung melalui *Cesium filter* dan *Mixed bed filter*.

3. Analisis Sampel Air Kolam dan Kanal

Sampel air kolam dan kanal masing-masing sebanyak 500 mL dikirim ke laboratorium analisis PTLR untuk dianalisis kandungan radionuklidanya menggunakan alat spektrometer gamma multy channel analyzer (MCA) tipe ORTEC. Waktu pencacahan dilakukan selama 1 jam untuk mendapatkan spektrum energi. Kemudian spektrum energi yang diperoleh dianalisis menggunakan software gamma vision. Alat MCA yang digunakan untuk analisis ini mempunyai batas limit deteksi 1×10^{-8} $\mu\text{Ci/mL}$.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengambilan sampel dilakukan minimal sekali dalam sebulan. Sampel air kolam dan kanal diidentifikasi dengan menambahkan tanggal pengambilan sampel. Analisis kadar radionuklida pada sampel air kolam dan air 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. 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 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 aktivitas radionuklida yang terkandung dalam sampel air dari kanal hubung (KH) dan kolam IPSB3 dinyatakan dalam $\mu\text{Ci/ml}$ (mikro Curie / mili liter).

Jenis radionuklida yang terdeteksi dan konsentrasi tertinggi dalam air kolam dan kanal KH-IPSB3 selama tahun 2015 ditampilkan pada **Tabel 2**. Data ini dapat digunakan sebagai pembandingan data analisis tahun 2016.

Tabel 2. Jenis Radionuklida yang Terdeteksi dalam Air Kolam dan Kanal KH-IPSB3 Tahun 2015

No.	Jenis Radionuklida	Aktivitas Tertinggi ($\mu\text{Ci/ml}$)	Keterangan
1.	Cs-137	$4,00 \times 10^{-7}$	Terdeteksi 1 kali
2.	J-133	$5,47 \times 10^{-4}$	Terdeteksi 4 kali
3.	Sb-124	$7,26 \times 10^{-5}$	Terdeteksi 8 kali

Data pengambilan sampel air kolam dan kanal pada tahun 2016 serta hasil analisisnya ditunjukkan pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Hasil Analisis Radionuklida Air Kolam dan Kanal KH-IPSB3 Tahun 2016

No.	Kode Sampel	Tanggal Analisis	Radionuklida	Aktivitas ($\mu\text{Ci/ml}$)
1.	Kanal -130116	14-01-2016	J-133	$5,52 \times 10^{-5}$
2.	Kolam -130116	13-01-2016	Sb-124	$4,78 \times 10^{-5}$
3.	Kanal -040216	10-03-2016	-	Dibawah limit deteksi*
4.	Kolam -040216	10-03-2016	-	Dibawah limit deteksi*
5.	Kanal -220216	14-03-2016	J-133	$5,32 \times 10^{-5}$
6.	Kolam -220216	14-03-2016	Sb-124	$4,00 \times 10^{-5}$
7.	Kanal -020316	14-03-2016	J-133	$5,32 \times 10^{-5}$
8.	Kolam -020316	05-04-2016	-	Dibawah limit deteksi*
9.	Kanal -150316	05-04-2016	-	Dibawah limit deteksi*
10.	Kolam -150316	05-04-2016	-	Dibawah limit deteksi*
11.	Kanal -180416	20-04-2016	J-133	$5,02 \times 10^{-5}$
			Sb-124	$3,98 \times 10^{-5}$
12.	Kolam -180416	20-04-2016	-	Dibawah limit deteksi*
13.	Kanal -090516	12-05-2016	-	Dibawah limit deteksi*
14.	Kolam -090516	13-05-2016	J-133	$4,78 \times 10^{-5}$
15.	Kanal -240516	26-05-2016	-	Dibawah limit deteksi*
16.	Kolam -240516	26-05-2016	-	Dibawah limit deteksi*
17.	Kanal -160616	20-06-2016	J-133	$4,20 \times 10^{-4}$
18.	Kolam -160616	20-06-2016	J-133	$5,52 \times 10^{-5}$
			Sb-124	$4,26 \times 10^{-5}$

No.	Kode Sampel	Tanggal Analisis	Radionuklida	Aktivitas ($\mu\text{Ci/ml}$)
19.	Kanal -190716	21-07-2016	J-133	$6,20 \times 10^{-4}$
20.	Kolam -190716	21-07-2016	Ce-143	$5,46 \times 10^{-5}$
			Sb-124	$5,20 \times 10^{-4}$
21.	Kanal -190816	23-08-2016	Ce-143	$5,42 \times 10^{-5}$
22.	Kolam -190816	23-08-2016	Ce-143	$5,36 \times 10^{-5}$
			J-133	$5,80 \times 10^{-4}$
			Sb-124	$4,04 \times 10^{-5}$
23.	Kanal -240816	30-08-2016	Ce-143	$5,36 \times 10^{-5}$
24.	Kolam -240816	30-08-2016	Ce-143	$4,72 \times 10^{-5}$
			J-133	$4,40 \times 10^{-4}$
25.	Kanal -070916	09-09-2016	Sb-124	$3,84 \times 10^{-5}$
26.	Kolam -070916	09-09-2016	Ce-143	$5,80 \times 10^{-5}$
			J-133	$5,60 \times 10^{-4}$
			Sb-124	$3,74 \times 10^{-5}$
27.	Kanal -280916	30-09-2016	-	Dibawah limit deteksi*
28.	Kolam -280916	30-09-2016	-	Dibawah limit deteksi*
29.	Kanal -211016	25-10-2016	J-133	$5,32 \times 10^{-5}$
			Sb-124	$4,62 \times 10^{-5}$
30.	Kolam -211016	25-10-2016	-	Dibawah limit deteksi*
31.	Kanal -071116	09-11-2016	Ce-143	$6,24 \times 10^{-5}$
			Cs-137	$2,00 \times 10^{-7}$
			J-133	$6,00 \times 10^{-4}$
32.	Kolam -071116	09-11-2016	Ce-143	$6,60 \times 10^{-5}$
			J-133	$4,80 \times 10^{-4}$
33.	Kanal -291216	30-12-2016	J-133	$5,02 \times 10^{-4}$
34.	Kolam -291216	30-12-2016	-	Dibawah limit deteksi*

Pada **Tabel 3** menunjukkan bahwa pada tahun 2016 terdapat kontaminasi radionuklida yang ditimbulkan dari pelepasan radionuklida hasil belah, yaitu: Cs-137, Sb-124, J-133 dan Ce-143. Dalam air kanal dan kolam tidak terdeteksi adanya radionuklida seperti I-131, Kr-85, dan Xe-133, radionuklida ini adalah produk fisi utama di fase gas sehingga mereka dapat dirilis ke udara ambien. Sedangkan kontaminasi radionuklida yang dihasilkan dari produk korosi yang teraktivasi seperti Fe-59, Co-60, Mn-54 juga tidak terdeteksi.

Radionuklida Cs-137 dan Sr-90 yang merupakan produk fisi yang penting untuk dipantau karena memiliki umur paro yang

panjang (masing-masing 30,17 tahun dan 28,8 tahun), sehingga kedua radionuklida tersebut merupakan kontributor utama yang terkandung dalam BBNB. Radionuklida Cs-137 merupakan 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. Radionuklida Sr-90 tidak terdeteksi karena radionuklida ini murni pemancar beta (β -emiter) sehingga tidak dapat dideteksi dengan menggunakan Spektrometer Gamma.

Dengan membandingkan antara aktivitas maksimum radionuklida (Tabel 3) dengan Batas Konten Radioaktivitas tertinggi yang diijinkan [10] / *Limit of Permitted Highest Radioactivity Content* (LPHRC) di lingkungan air menunjukkan bahwa sebagian besar radioaktivitas dari Cs-137 dan Sr-90 dalam sampel air (kanal dan kolam) tidak terdeteksi (tidak ada) dan hanya sekali dideteksi untuk Cs-137 dengan konsentrasi $2,00 \times 10^{-7}$ $\mu\text{Ci/ml}$ pada tanggal 7 Nopember 2016 pada sampel air kanal tapi masih lebih rendah dari LPHRC (7×10^2 Bq/L atau $1,891 \times 10^{-5}$ $\mu\text{Ci/ml}$).

Radionuklida yang sering terdeteksi yaitu radionuklida hasil belah I-133 dan Sb-124 yang memiliki umur paro pendek yaitu masing-masing 20 jam dan 60 hari. Hasil analisis konsentrasi radionuklida Sb-124 dan J-133 menunjukkan ada yang masih lebih rendah dari LPHRC tapi ada juga lebih tinggi dari LPHRC (7×10^2 Bq/L atau $1,891 \times 10^{-5}$ $\mu\text{Ci/ml}$). Konsentrasi tertinggi untuk Sb-124 yaitu $5,2 \times 10^{-5}$ $\mu\text{Ci/ml}$, sedangkan untuk J-133 adalah $6,2 \times 10^{-4}$ $\mu\text{Ci/ml}$.

Produk fisi berupa Ru-103, Nd-147, Y-91, dan Te-131 yang memiliki umur paro pendek, tidak pernah terdeteksi. Produk fisi dari Ru-103 ($T_{1/2} = 39,8$ hari) memiliki perilaku seperti Cs-137 dan Sr-90. Produk fisi dari Nd-147 ($T_{1/2} = 11,3$ hari) dan Y-91 ($T_{1/2} = 61$ hari). Sedangkan radionuklida dari Te-131 memiliki waktu paruh yang sangat singkat ($T_{1/2} = 25$ menit).

Jika dibandingkan dengan hasil analisis radionuklida pada tahun 2015, maka ada radionuklida baru yang terdeteksi pada tahun 2016 yang tidak pernah terdeteksi pada tahun sebelumnya (2015) yaitu Ce-143. Radionuklida Ce-143 mulai terdeteksi pada tanggal 9 Juli 2016 merupakan radionuklida produk fisi yang mempunyai umur paro 1,4 hari. Konsentrasi tertinggi untuk radionuklida Ce-143 adalah $6,60 \times 10^{-5}$ $\mu\text{Ci/ml}$. Jika dibandingkan dengan LPHRC maka nilai tersebut lebih tinggi dari LPHRC (7×10^2 Bq/L atau $1,891 \times 10^{-5}$ $\mu\text{Ci/ml}$). Radionuklida Ce-143 dimungkinkan berasal dari kegiatan transfer target teriradiasi dimana kegiatan ini dilakukan mulai tahun 2016.

Berdasarkan Tabel 2 menunjukkan bahwa ada kontaminasi Cs-137, Sb-124, J-133 dan Ce-143 dalam sistem pendingin air dari fasilitas KH-IPSB3 tidak selalu muncul. Hal ini dimungkinkan karena dioperasikannya unit pemurnian/purifikasi menggunakan resin penukar ion yang mampu menangkap unsur radioaktif kontaminan tersebut.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis tingkat kontaminasi radionuklida di kanal (KH) dan kolam (IPSB3) selama periode bulan Januari sampai Desember 2016 dapat disimpulkan bahwa kontaminasi berupa radionuklida hasil belah yaitu Cs-137, Sb-124, J-133 dan Ce-143. Radionuklida Cs-137 yang memiliki waktu paro panjang terdapat dalam sistem pendingin air KH-IPSB3 masih lebih rendah dari batas radioaktivitas tertinggi yang diijinkan (LPHRC). Sedangkan tingkat kontaminasi radionuklida Sb-124, J-133 dan Ce-143 yang memiliki waktu paro sangat singkat kadang-kadang lebih tinggi dari LPHRC yang selanjutnya dapat ditangkap dengan menggunakan sistem purifikasi/pemurnian air. Radionuklida Cs-137, J-133, dan Sb-124 merupakan radionuklida yang sudah muncul pada riwayat hasil analisis pada tahun 2015, sementara radionuklida Ce-143 mulai muncul pada tahun 2016. Selain itu, dalam sistem pendingin air dari kanal maupun kolam KH-IPSB3 tidak menunjukkan adanya kontaminasi dari aktivasi produk korosi seperti Zn-65, Co-60, dan Mn-54. Berdasarkan evaluasi dan analisis tingkat kontaminasi dapat disimpulkan juga bahwa pengoperasian fasilitas KH-IPSB3 dalam kondisi baik dan aman sesuai dengan standar keselamatan yang berlaku.

DAFTAR PUSTAKA

1. 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.
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 Hubungan Instalasi Penyimpanan Sementara Bahan Bakar Bekas (KH-IPSB3)", Diktat Pelatihan Operator dan Supervisor KH-IPSB3, 2012.
4. Laporan Analisis Keselamatan Kanal Hubungan Instalasi Penyimpanan Sementara Bahan Bakar Bekas (LAK KH-IPSB3), rev 7, PTLR – BATAN. 2009.

5. Dyah S Rahayu, *Report of Repatriation for Spent Nuclear Fuel arising from MPR-GAS, BATAN, Serpong, Tangerang Selatan Banten, Indonesia*. 2010.
6. MANSON BENEDICT, et al, "*Nuclear Chemical Engineering*", *Second Edition*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1981.
7. GUNANDJAR, "Teknologi Nuklir Dan Aplikasinya", Diklat Ceramah Umum di Universitas Pakuan, Bogor, 6 Oktober 2007.
8. R.W.THIELE, "*Nuclear Science and It's Applications*", A Training Manual, IAEA, Vienna, April – July 1979.
9. Zainus Salimin, dkk., "Dokumen Teknis Kajian Pengolahan Limbah Radioaktif Tingkat Rendah dan Sedang PLTN PWR 1000 MWe dan Kajian Pengelolaan Limbah RDE Tipe HTR-10" Revisi 0. PTLR – BATAN, Serpong. 2014
10. BAPETEN, Peraturan Kepala BAPETEN No. 07 Tahun 2013 tentang Nilai Batas Radioaktivitas Lingkungan. 2013.

ASPEK LINGKUNGAN DALAM PENERAPAN TINGKAT KLIERENS LIMBAH RADIOAKTIF

Moh. Cecep Cepi Hikmat¹, Moh. Hasroel Thayib², Dadong Iskandar³

1 Pusat Teknologi Limbah Radioaktif-Badan Tenaga Nuklir Nasional, Gd. 50 Kawasan Puspiptek Serpong
2 Sekolah Ilmu Lingkungan-Universitas Indonesia, Jl. Salemba No 4 Jakarta Pusat

3 Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi-Badan Tenaga Nuklir Nasional, Jl. Lebak Bulus Raya No.49,
Jakarta Selatan
ceceptea@batan.go.id

ABSTRAK

ASPEK LINGKUNGAN DALAM PENERAPAN TINGKAT KLIERENS LIMBAH RADIOAKTIF. Pemanfaatan teknologi nuklir untuk kesejahteraan manusia telah merambah ke berbagai bidang kehidupan. Dalam pemanfaatan dan pengembangan iptek nuklir selalu akan dihasilkan limbah radioaktif sebagai sisa proses. Limbah radioaktif yang dihasilkan harus dikelola dengan baik untuk mencegah timbulnya efek radiasi pada pekerja, anggota masyarakat, dan lingkungan hidup. Lingkungan hidup harus dikelola dengan baik, karena kita sebagai manusia adalah bagian yang tak terpisahkan dari lingkungan hidup itu sendiri. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui aspek lingkungan yang diakibatkan dari penerapan tingkat klierens limbah radioaktif, sedangkan manfaat dari penelitian ini adalah dapat memperkuat pemangku kepentingan dalam memutuskan program klierens limbah radioaktif ke depannya. Metodologi penyusunan makalah ini adalah dengan melakukan analisis limbah radioaktif menggunakan spektrometer gamma digiBASE, inventarisasi data sekunder untuk perangkat lunak RESRAD-OFFSITE, simulasi data dengan perangkat lunak RESRAD-OFFSITE dan analisis keluaran RESRAD –OFFSITE. Hasil simulasi menunjukkan bahwa dosis efektif paling tinggi yang diterima oleh individu adalah sekitar $1,40 \times 10^{-44}$ $\mu\text{Sv}/\text{tahun}$, selain itu tidak ada risiko kanker dari awal pengoperasian fasilitas *landfill* sampai ratusan tahun. Dapat disimpulkan bahwa paparan radiasi dari limbah klierens tidak memberikan penambahan dosis di lingkungan, sehingga tidak memberikan dampak yang signifikan pada aspek lingkungan.

Kata Kunci: lingkungan, tingkat klierens, limbah radioaktif.

ABSTRACT

ENVIRONMENT ASPECT ON THE IMPLEMENTATION OF RADIOACTIVE WASTE CLIERENS. Utilization of nuclear technology for human welfare has penetrated into various areas of life. In the utilization and development of nuclear science and technology will always be generated radioactive waste as the rest of the process. Radioactive waste generated must be well managed to prevent the effects of radiation on workers, community members, and the environment. The environment must be well managed, because we as human beings are an integral part of the environment itself. The purpose of this research is to know the environmental aspect caused by applying the radioactive waste clearance level, while the benefit of this research is to strengthen the stakeholders in deciding the radioactive waste clearance programme in the future. The methodology of this paper is to conduct a radioactive waste analysis using the digiBASE gamma spectrometer, secondary data inventory for RESRAD-OFFSITE software, data simulation with RESRAD-OFFSITE software and RESRAD-OFFSITE output analysis. The simulation results show that the highest effective dose received by individuals is about 1.40×10^{-44} $\mu\text{Sv}/\text{year}$, otherwise there is no cancer risk from the start of the operation of landfill facilities for hundreds of years. It can be concluded that radiation exposure from waste clearance does not provide additional doses in the environment, so it does not have a significant impact on environmental aspects.

Keywords: environment, clearance level, radioactive waste

PENDAHULUAN

Pemanfaatan teknologi nuklir untuk kesejahteraan manusia telah merambah ke berbagai bidang kehidupan seperti kesehatan, industri, penelitian kebumiharian, energi, pangan dan pertanian. Seiring perkembangan teknologi nuklir tersebut, maka sangat dibutuhkan metode, teknik dan atau uji yang handal untuk menentukan besarnya dosis yang diterima oleh seseorang sehingga keselamatannya terjamin [1]. Dalam pemanfaatan dan pengembangan iptek nuklir selalu akan dihasilkan limbah radioaktif sebagai sisa proses. Limbah radioaktif yang dihasilkan harus dikelola dengan baik dan sesuai dengan peraturan yang berlaku, hal ini untuk

mencegah timbulnya efek radiasi pada pekerja, anggota masyarakat, dan lingkungan hidup, serta untuk mencegah timbulnya potensi yang dapat mengganggu kesehatan masyarakat dan lingkungan [2].

Lingkungan hidup adalah ruang dimana aktivitas manusia berlangsung, manusia memanfaatkan sumber daya alam untuk memenuhi kebutuhan dan kelangsungan hidupnya [3]. Lingkungan hidup harus dikelola dengan baik, karena kita sebagai manusia adalah bagian yang tak terpisahkan dari lingkungan hidup itu sendiri. Pengelolaan lingkungan hidup dewasa ini masih bersifat antroposentris artinya masih melihat permasalahan dari sudut

kepentingan manusia. Unsur-unsur lingkungan hidup seperti unsur biotik dan abiotik masih diperhatikan, namun perhatian itu secara eksplisit maupun implisit masih dihubungkan dengan kepentingan manusia [4].

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui aspek lingkungan yang diakibatkan dari penerapan tingkat klierens limbah radioaktif, sedangkan manfaat yang akan diperoleh dari penelitian ini adalah dengan diketahuinya aspek pada lingkungan maka dapat memperkuat pemangku kepentingan dalam memutuskan program klierens limbah radioaktif ke depannya. Pengelolaan limbah radioaktif menjadi tanggung jawab penghasil limbah dan Badan Pelaksana dalam hal ini adalah Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) sesuai amanat Undang-Undang Nomor 10 tahun 1997 tentang Ketenaganukliran dan Peraturan Pemerintah Nomor 61 tahun 2013 tentang Pengelolaan Limbah Radioaktif. Berdasarkan basis data yang ada di Pusat Teknologi Limbah Radioaktif (PTLR), bahwa limbah radioaktif yang dihasilkan dari pemanfaatan tenaga nuklir dari tahun ke tahun mengalami penambahan, sehingga apabila hal ini dibiarkan terus berlanjut tanpa adanya solusi yang berkelanjutan, maka suatu saat akan menjadi permasalahan baru bagi bangsa ini. Oleh karena itu diperlukan suatu terobosan untuk mengurangi volume limbah radioaktif tersebut, sehingga tidak menjadi beban bagi generasi yang akan datang.

Sumber limbah radioaktif yang dihasilkan dari pemanfaatan iptek nuklir, diantaranya berasal dari [5]:

- a. Pusat penelitian tenaga nuklir,
- b. Rumah sakit,
- c. Industri,
- d. Universitas dan lembaga penelitian,
- e. Dekontaminasi dan dekomisioning instalasi nuklir/fasilitas radiasi.

Badan tenaga atom internasional atau *International Atomic Energy Agency* (IAEA) telah memberikan suatu terobosan yang cukup baik terkait penanganan limbah radioaktif ini yaitu dengan adanya penerapan tingkat klierens limbah radioaktif. Tingkat klierens ini sudah dikenalkan oleh IAEA kepada negara anggotanya termasuk Indonesia sejak tahun 1996 [6].

Sumber radioaktif dan bahan/peralatan yang bersifat radioaktif dapat dihapus dari sistem pengawasan badan pengawas, dimana dampak radiologik yang diberikan setelah penghapusan dari sistem ini cukup rendah, karena tidak ada jaminan pengawasan lebih lanjut. Kriteria sumber radioaktif dan bahan/peralatan yang bersifat radioaktif dapat dibebaskan dari pengawasan badan pengawas adalah dosis efektif yang ditimbulkan dari sumber radioaktif tersebut tidak melebihi 1 mSv dalam satu tahun [7].

Limbah yang sudah masuk kategori klierens berarti limbah tersebut sudah aman bagi lingkungan, limbah tersebut dapat dilepas ke lingkungan apabila sudah mendapatkan rekomendasi/persetujuan dari badan pengawas. Surat rekomendasi ini sangat penting karena limbah ini sudah tidak akan dilakukan lagi pengawasan karena sudah dianggap aman untuk lingkungan. Klierens adalah pembebasan sumber radiasi pengion dari skema pengawasan badan pengawas untuk dibuang (*dispose*) atau digunakan kembali (*reuse*), sedangkan tingkat klierens adalah batas nilai konsentrasi aktivitas generik tiap radionuklida yang terkandung dalam limbah yang berlaku umum untuk eksklusif, eksemis dan klierens [8].

Klasifikasi limbah radioaktif menurut IAEA terdiri atas: limbah aktivitas tinggi (*high level waste*), limbah aktivitas rendah dan sedang (*low and intermediate level waste*) dan limbah yang dikecualikan (*exempt waste*) [9]. Berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 61 tahun 2013 tentang Pengelolaan Limbah Radioaktif bahwa limbah radioaktif diklasifikasikan menjadi 3 bagian yaitu:

1. Limbah tingkat rendah yaitu limbah yang berada di atas tingkat aman (tingkat klierens) tetapi di bawah tingkat sedang yang tidak memerlukan penahan radiasi selama penanganan dalam keadaan normal dan pengangkutan,
2. Limbah tingkat sedang yaitu limbah radioaktif dengan aktivitas di atas tingkat rendah tetapi di bawah tingkat tinggi yang tidak memerlukan pendingin, dan memerlukan penahan radiasi selama penanganan dalam keadaan normal dan pengangkutan,
3. Limbah tingkat tinggi yaitu limbah radioaktif dengan aktivitas di atas tingkat sedang, yang memerlukan pendingin dan penahan radiasi dalam penanganan pada keadaan normal dan pengangkutan, termasuk bahan bakar nuklir bekas.

Tipe atau jenis limbah radioaktif yang dihasilkan dari pemanfaatan zat radioaktif dapat dibedakan berdasarkan sifat fisika, kimia dan biologinya, yaitu [10]:

- a. Limbah cair, adalah cairan yang telah terkontaminasi yang berasal dari sisa-sisa larutan untuk analisis, air cucian peralatan yang terkontaminasi, air dekontaminasi pekerja dan juga air pendingin reaktor,
- b. Limbah cair organik, adalah limbah radioaktif cair organik berasal dari kedokteran, industri, dan pusat penelitian,
- c. Limbah padat, terbagi menjadi 3 bagian yaitu limbah padat terkompaksi (*compactible*), limbah padat terbakar (*combustible/burnable*), dan limbah tidak

- terkompaksi (*noncompactible*) dan tidak terbakar (*noncombustible/nonburnable*).
- d. Limbah padat basah/semi cair, adalah limbah yang berupa resin penukar ion, lumpur hasil presipitasi, dan konsentrat hasil evaporasi,
 - e. Limbah biologi, adalah limbah yang berasal dari kegiatan penelitian yang menggunakan jaringan atau organ tubuh binatang percobaan yang terkontaminasi zat radioaktif.

Prinsip dasar dalam pengolahan limbah radioaktif adalah reduksi volume dan immobilisasi. Teknik reduksi volume untuk limbah radioaktif cair dilakukan dengan cara: evaporasi (penguapan), koagulasi (penggumpalan), flokulasi (pembentukan flok/penggumpalan) dan penukar ion, sedangkan reduksi volume untuk limbah radioaktif padat dilakukan dengan cara: kompaksi (penekanan), dan insenerasi (pembakaran). Setelah limbah radioaktif tersebut mencapai reduksi volume maksimal, kemudian dilakukan proses immobilisasi dengan matriks yang sesuai atau proses kondisioning yang tepat agar bentuk akhir hasil pengolahan dapat dipindahkan, dan disimpan secara mudah dan aman [11].

METODE PENELITIAN

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah limbah radioaktif padat pra-olah dalam drum 100 liter, palet kayu, sumber standar ^{60}Co dan ^{137}Cs , sedangkan alat yang digunakan adalah forklip, surveimeter, digiBASE, alat bantu naik turun drum 100 liter.

Tahapan kerja yang dilakukan pada penelitian ini adalah:

1. Identifikasi limbah radioaktif yang meliputi:
 - a. Pensortiran data limbah,
 - b. Pencarian sampel limbah radioaktif,
 - c. Pemilahan sampel limbah radioaktif,
 - d. Pemisahan sampel limbah radioaktif,
2. Pengukuran paparan radiasi sampel limbah radioaktif, sampel yang telah memenuhi kategori, diukur ulang paparan radiasinya pada permukaan dan jarak 1 meter dari drumnya, pengukuran menggunakan surveimeter FAG FH 40F2 yang sudah terkalibrasi. Paparan radiasi yang terukur dari limbahnya dikurangi dengan paparan radiasi latar (*background*), sehingga diperoleh paparan radiasi murni yang dimiliki oleh limbah tersebut,
3. Pencacahan sampel limbah radioaktif, yang bertujuan untuk mengidentifikasi konsentrasi aktivitas radionuklida yang terkandung di dalam limbah, dianalisis

menggunakan spektrometer gamma digiBASE. Detektor yang digunakan pada alat spektrometer gamma digiBASE adalah detektor NaI(Tl) (Natrium Iodida (Thalium)).

Pengumpulan data sekunder yang dibutuhkan sebagai parameter input RESRAD-OFFSITE code, kemudian dilanjutkan dengan simulasi data sekunder menggunakan RESRAD-OFFSITE code dan tahap terakhir adalah analisis terhadap keluaran hasil simulasi RESRAD-OFFSITE code untuk mengetahui dampak radiologis dari suatu fasilitas *landfill* limbah klierens sebagai dasar penilaian kelayakan fasilitas landfill tersebut.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Limbah radioaktif yang akan dinyatakan klierens harus dilakukan tahapan identifikasi, hal ini untuk memastikan bahwa limbah yang dipilih telah benar-benar masuk dalam kategori limbah klierens. Limbah radioaktif yang dijadikan sampel pada penelitian ini mempunyai paparan radiasi lebih kecil atau sama dengan $0,114 \mu\text{Sv/jam}$, besaran ini diperoleh dari Nilai Batas Dosis (NBD) untuk anggota masyarakat yang telah ditetapkan oleh BAPETEN yaitu 1 mSv/tahun yang tertuang dalam Peraturan Kepala BAPETEN No 4 tahun 2013 tentang Proteksi dan Keselamatan Radiasi dalam Pemanfaatan Tenaga Nuklir. Nilai ini merupakan dosis tambahan yang diizinkan dari pemanfaatan tenaga nuklir ke lingkungan.

Sampel limbah radioaktif yang masuk kategori klierens kemudian dibawa ke tempat yang jauh dari sumber paparan radiasi lainnya, kemudian dilakukan pengukuran paparan radiasi ulang untuk masing-masing limbah tersebut. Hal ini untuk mengetahui kondisi paparan radiasi terkini dari limbah tersebut. Terdapat sebelas sampel limbah yang memenuhi kriteria yang telah ditetapkan, kesebelas limbah tersebut berasal dari internal BATAN yaitu Pusat Teknologi Limbah Radoaktif (PTLR), Pusat Teknologi Radioisotop dan Radiofarmaka (PTRR), dan Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir (PTBBN). Data hasil pengukuran paparan radiasi sampel limbah tersebut dapat dilihat pada Sampel limbah yang sudah memenuhi kriteria, selanjutnya dicacah menggunakan spektrometer gamma digiBASE untuk mengetahui kandungan dari radionuklida yang ada di dalam limbah tersebut. Hasil pencacahan sampel limbah radioaktif tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 1 Paparan Radiasi Sampel Limbah Radioaktif

No.	Asal Limbah	Paparan Radiasi ($\mu\text{Sv}/\text{jam}$)		No. Drum
		Kontak	1 Meter	
1.	PTRR	0,04	0,02	15.1
2.	PTRR	0,06	0,03	15.2
3.	PTRR	0,08	0,04	15.6
4.	PTRR	0,06	0,02	15.7
5.	PTRR	0,05	0,01	16.8
6.	PTRR	0,04	0,01	25.5
7.	PTBBN	0,08	0,04	2146
8.	PTBBN	0,04	0,02	2160
9.	PTLR	0,04	0,01	25.4
10.	PTLR-IS1	0,04	0,02	2192
11.	PTLR	0,04	0,01	2193

Tabel 2 Hasil Pencacahan Limbah Radioaktif

No.	Asal Limbah	No. Palet	Massa (kg)	Radionuklida	Konsentrasi Aktivitas (Bq/g)	Kategori
1	PTRR	15.1	15	^{60}Co	<MDC	Klierens
				^{137}Cs	<MDC	
2	PTRR	15.2	14	^{60}Co	<MDC	Klierens
				^{137}Cs	<MDC	
3	PTRR	15.6	15	^{60}Co	$0,0657\pm 0,0083$	Klierens
				^{137}Cs	<MDC	
4	PTRR	15.7	14,9	^{60}Co	$0,2973\pm 0,0079$	Tidak Klierens
				^{137}Cs	<MDC	
5	PTRR	16.8	15	^{60}Co	<MDC	Klierens
				^{137}Cs	<MDC	
6	PTRR	25.5	13,9	^{60}Co	<MDC	Klierens
				^{137}Cs	<MDC	
7	PTBBN	2146	26	^{60}Co	<MDC	Tidak Klierens
				^{137}Cs	$0,5515\pm 0,0040$	
8	PTBBN	2160	28	^{60}Co	<MDC	Klierens
				^{137}Cs	<MDC	
9	PTLR	25.4	11	^{60}Co	<MDC	Klierens
				^{137}Cs	<MDC	
10	PTLR	2192	12	^{60}Co	$0,0916\pm 0,0104$	Tidak Klierens
				^{137}Cs	$0,3319\pm 0,0054$	
11	PTLR	2193	14	^{60}Co	<MDC	Klierens
				^{137}Cs	<MDC	

Batasan: $^{137}\text{Cs} = 0,1 \text{ Bq/g}$; $^{60}\text{Co} = 0,1 \text{ Bq/g}$ [12]

(Keterangan: MDC= *Minimum Detectable Concentration*)

Berdasarkan data pada Tabel 2 menunjukkan bahwa pada sampel limbah radioaktif tersebut telah teridentifikasi kandungan radionuklida ^{137}Cs dan ^{60}Co . Sebelas drum limbah yang dianalisis terdapat delapan drum limbah yang mengandung radionuklida dengan konsentrasi aktivitasnya di bawah batasan klierens, limbah yang sudah masuk kategori klierens ini dapat

dikeluarkan dari kelompok limbah radioaktif/*interim storage*, sehingga hal ini dapat mengurangi jumlah populasi limbah yang ada di *interim storage*, dan apabila hal ini terus dilakukan secara berkelanjutan, maka jumlah limbah yang ada di *interim storage* berangsur akan berkurang.

Analisis konsentrasi aktivitas radionuklida yang terkandung di dalam limbah,

juga dapat dilakukan oleh semua penghasil limbah, dan dapat menerapkan tingkat klierens pada limbahnya. Setelah diperoleh hasil analisis dari limbah tersebut, kemudian mengajukan izin penetapan klierens ke BAPETEN. Berdasarkan data yang diajukan, BAPETEN akan melakukan verifikasi lapangan, setelah data tersebut sesuai dengan yang dipersyaratkan, maka Kepala BAPETEN akan mengeluarkan surat penetapan klierens.

Aspek lingkungan perlu diperhatikan dalam penerapan tingkat klierens limbah radioaktif, karena apabila limbah klierens ini dibuang ke lingkungan (*dispose*), maka lingkungan sebagai tujuan akhir yang akan terbebani oleh limbah tersebut, yang ujung-ujungnya akan sampai juga kepada makhluk hidup termasuk manusia.

Sebaran radionuklida di alam/lingkungan dapat diketahui dengan pendekatan menggunakan perangkat lunak *Residual Radioactivity* (RESRAD). Perangkat lunak ini dapat memperkirakan sebaran radionuklida tersebut baik di tanah, badan air, maupun tanaman. Sebagai umpan/inputan bagi perangkat lunak ini adalah konsentrasi aktivitas radionuklida yang diperoleh dari hasil analisis sampel klierens limbah radioaktif menggunakan spektrometer gamma.

Mengacu pada Tabel 2, dimana limbah yang mempunyai aktivitas radionuklida tertinggi yang akan digunakan sebagai dasar perhitungan dalam RESRAD. Konsentrasi aktivitas ^{60}Co tertinggi adalah sebesar $0,0657 \pm 0,0083 = 0,0740$ Bq/g, sedangkan konsentrasi aktivitas ^{137}Cs tertinggi adalah sebesar $0,5515 \pm 0,0040 = 0,5555$ Bq/g (dari data tidak klierens).

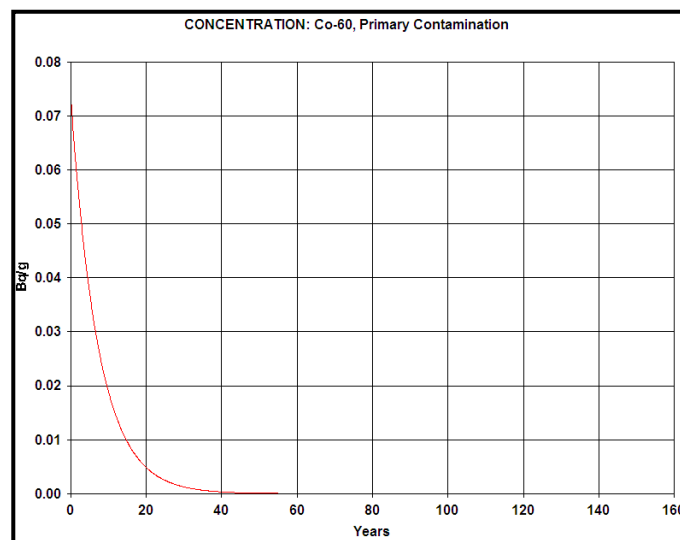
Untuk menghitung dosis menggunakan RESRAD maka tahapannya adalah menyiapkan data pendukung secara nyata, jika tidak tersedia dapat membuat asumsi-asumsi atau mengikuti data yang telah disediakan oleh RESRAD (*default*). Data yang digunakan pada penelitian ini adalah data nyata, data asumsi dan data *default*.

Individu diasumsikan berdomisili secara permanen pada jarak 1.000 m dari lokasi pembuangan (*dispose*) limbah klierens. Pemenuhan kebutuhan air individu dirancang hanya berasal dari air tanah/sumur. Individu juga diasumsikan mengkonsumsi sayur, buah, daging, dan lain-lain yang hanya berasal dari lokasi setempat. Fasilitas *landfill* dirancang untuk menjadi tempat pembuangan (*dispose*) limbah klierens dengan dimensi lebar: 10 m, panjang: 10 m dan kedalaman: 10 m.

Hasil dari simulasi perangkat lunak RESRAD pada disain fasilitas pembuangan (*dispose*) limbah klierens tersebut ditampilkan pada Gambar 1 sampai Gambar 3.

Berdasarkan Gambar 1 terlihat bahwa konsentrasi aktivitas ^{60}Co mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya waktu. Pada tahun ke 40 atau delapan kali dari umur paronya (umur paro $^{60}\text{Co} = 5,2$ tahun) aktivitasnya sudah hampir mendekati nol. Konsentrasi ^{137}Cs pun mengalami penurunan seiring bertambahnya waktu, konsentrasi aktivitas ^{137}Cs dapat dilihat pada Gambar 2.

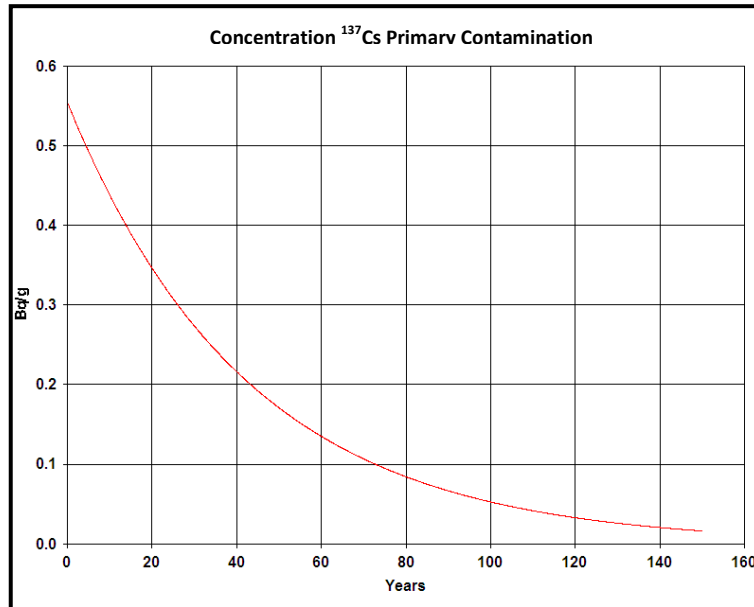
Berdasarkan pada Gambar 2 terlihat bahwa konsentrasi aktivitas ^{137}Cs mengalami penurunan juga seiring dengan bertambahnya waktu. Pada tahun ke 30, konsentrasinya menjadi separo dari aktivitas awal yaitu 0,27 Bq/g, hal ini sesuai dengan umur paro yang dimiliki oleh ^{137}Cs yaitu 30 tahun.



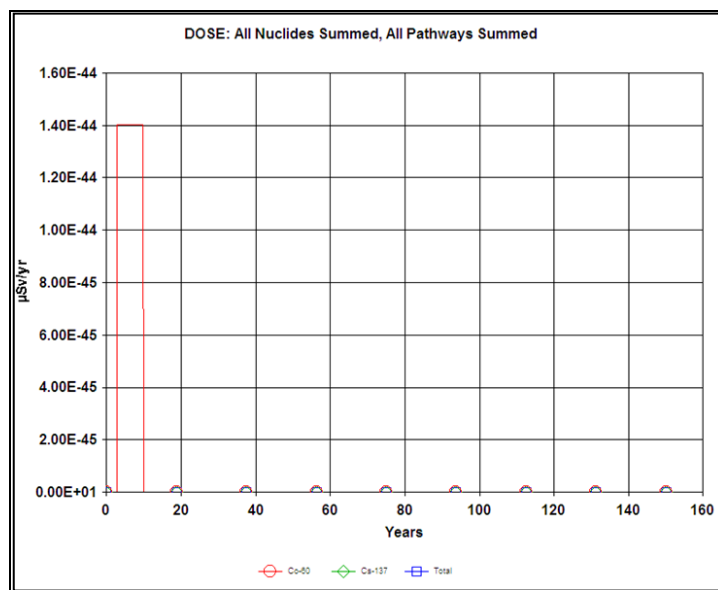
Gambar 1 Konsentrasi ^{60}Co di dalam *Landfill*

Total dosis efektif berdasarkan simulasi RESRAD yang diterima oleh individu dari seluruh jalur paparan akan semakin menurun dengan bertambahnya usia radionuklida di fasilitas pembuangan, total dosis tertinggi adalah $1,40 \times 10^{-44}$ $\mu\text{Sv}/\text{tahun}$. Grafik total dosis ^{137}Cs

dan ^{60}Co yang diberikan pada lingkungan dapat dilihat pada Gambar 3. Besarnya dosis tersebut masih sangat jauh di bawah nilai pembatas dosis untuk masyarakat yang diperkenankan pada satu kegiatan pemanfaatan tenaga nuklir, yaitu sebesar $0,3 \text{ mSv}/\text{tahun}$.



Gambar 2 Konsentrasi ^{137}Cs di Dalam Landfill



Gambar 3 Total Dosis ^{60}Co dan ^{137}Cs di Lingkungan

Kecilnya dosis yang dihasilkan dari hasil simulasi seperti yang terlihat pada Gambar 3 tersebut masih sangatlah wajar karena konsentrasi aktivitas yang menjadi inputan perangkat lunak RESRAD juga kecil yaitu ^{137}Cs : $0,5555 \text{ Bq}/\text{g}$ dan ^{60}Co : $0,0740 \text{ Bq}/\text{g}$. Apabila dibandingkan dengan hasil penelitian tentang fasilitas landfill slag timah, dimana konsentrasi

aktivitas radionuklida dalam slag timah sangat besar yaitu Radium-226: $5,924 \pm 0,321 \text{ (Bq/g)}$, Thorium-232: $11,619 \pm 0,624 \text{ Bq/g}$, Thorium-228: $11,839 \pm 0,641 \text{ Bq/g}$, Uranium-238: $10,005 \pm 0,913 \text{ Bq/g}$, dan Kalium-40: $0,912 \pm 0,061 \text{ Bq/g}$. Dosis tertinggi terjadi pada saat landfill tersebut mulai beroperasi, yaitu sekitar $9,13 \mu\text{Sv}/\text{tahun}$, nilai dosis tersebut masih di bawah nilai pembatas

dosis yang diperkenankan pada satu kegiatan pemanfaatan tenaga nuklir, yaitu sebesar 0,3 mSv/tahun [13]. Sehingga pantaslah apabila dosis limbah klierens yang dihasilkan sangat kecil.

Berdasarkan hasil simulasi perangkat lunak RESRAD menunjukkan bahwa limbah klierens yang dibuang ke lingkungan (*dispose*), tidak memberikan penambahan dosis pada air permukaan, air sumur, susu, daging, ikan maupun hasil pertanian penduduk yang berlokasi pada jarak 1 km dari daerah pembuangan, hal ini disebabkan karena konsentrasi aktivitas radionuklidanya sangat kecil.

Begitu juga dengan risiko kanker pada individu yang diakibatkan oleh paparan radiasi yang berasal dari fasilitas pembuangan (*dispose*) limbah klierens, hasil simulasi perangkat lunak RESRAD menunjukkan bahwa limbah klierens yang dibuang ke lingkungan tidak menyebabkan timbulnya risiko kanker. Hal ini disebabkan karena tidak ada dosis tambahan yang diterima oleh makanan maupun minuman yang dikonsumsi oleh penduduk sekitar dari limbah klierens tersebut.

Tidak adanya resiko kanker dari awal pengoperasian fasilitas *landfill* sampai ratusan tahun, disebabkan karena konsentrasi aktivitas yang dibuang ke lingkungan (*dispose*) sangat kecil yaitu $\leq 0,1$ Bq/g. Apabila dibandingkan dengan simulasi RESRAD pada fasilitas *landfill* slag timah yang konsentrasi aktivitas radionuklidanya besar saja risiko kankernya bernilai $6,8 \times 10^{-6}$, yang dapat diartikan bahwa kemungkinan paparan radiasi yang diterima individu dapat mengakibatkan kanker adalah $6,8 \times 10^{-6}$ kali dari keseluruhan kemungkinan penyebab kanker pada individu [13].

Berdasarkan hasil simulasi tersebut menunjukkan bahwa limbah radioaktif yang sudah klierens apabila dibuang ke lingkungan (*dispose*) tidak memberikan dampak negatif bagi makhluk hidup termasuk manusia. Dengan demikian penerapan tingkat klierens limbah radioaktif dapat menjadi solusi untuk mengurangi jumlah limbah radioaktif yang aktivitas/paparannya masuk kategori klierens.

KESIMPULAN

Berdasarkan penjabaran yang telah dijelaskan sebelumnya dapat disimpulkan bahwa paparan radiasi dari limbah klierens tidak memberikan penambahan dosis di lingkungan baik pada tanah, air maupun tanaman. Dengan demikian, maka penerapan tingkat klierens limbah radioaktif tidak memberikan dampak yang signifikan pada aspek lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

1. Lusiyanti, Y. & Syaifudin, M. (2004). Nuklir Mengabdikan Kemanusiaan, Buletin ALARA. Jakarta.
2. Wiyono dan Bunawas. (2007). Penentuan Aktivitas Limbah Radioaktif Padat Menggunakan Spektrometer Gamma *In-Situ*. Prosiding Seminar Teknologi Pengelolaan Limbah V. Pusat Teknologi Limbah Radioaktif – BATAN. Serpong
3. Soemarwoto, O. (2001). Ekologi, Lingkungan Hidup dan Pembangunan. Jakarta: Djambatan
4. Rusdina, A. (2015). Membumikan Etika Lingkungan Bagi Upaya Membudayakan Pengelolaan Lingkungan Yang Bertanggung Jawab. Fakultas Sains dan Teknologi. Universitas Islam Negeri Sunan Gunung Djati. Bandung
5. Untara. (2005). Pengelolaan Limbah dan Aspek Keselamatan Radiasi. Pelatihan Petugas Proteksi Radiasi. Pusdiklat. BATAN. Jakarta.
6. European Commission. (2000). *Practical Use of the Concepts of Klierens and Exemption-Part 1. Guidance on General Klierens Levels for Practices*. Radiation Protection 122.
7. IAEA. (2004). *Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance*. RS-G-1.7. Vienna
8. Syahrir. (2006). Aplikasi Tingkat Klierens dalam Pengelolaan Limbah Radioaktif di BATAN. Seminar Keselamatan Nuklir. Badan Pengawas Tenaga Nuklir. Jakarta.
9. IAEA. (1994). *Classification of Radioactive Waste*. Safety Series No. 111-G-1.1. Vienna
10. BATAN. (2010). Pengelolaan Limbah. Pelatihan Penyegaran Proteksi Radiasi Instalasi Nuklir, Pusdiklat. BATAN. Jakarta
11. Wati. (2013). Pengelolaan Berbagai Jenis Limbah Radioaktif dari Instalasi Produksi Radioisotop. Jurnal Teknologi Pengelolaan Limbah. Pusat Teknologi Limbah Radioaktif. BATAN. Serpong
12. Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 16 tahun 2012 tentang Tingkat Klierens
13. Alfian, M. (2011). Penggunaan Perangkat Lunak RESRAD-OFFSITE untuk Memperkirakan Risiko Radiologik Suatu Fasilitas *Landfill* Slag Timah. Seminar Nasional Teknologi Informasi dan Komunikasi Terapan 2011. Universitas Dian Nuswantoro. Semarang.

PENGARUH KOMPOSISI BARIT DAN FLY ASH BATUBARA TERHADAP SEMENTASI LIMBAH RADIOAKTIF

Tri Sulistiyo Hari Nugroho¹⁾, Susetyo Hario Putero²⁾, Kusnanto²⁾

Pusat Teknologi Limbah Radioaktif-BATAN Komplek Puspiptek Gd.50¹⁾
Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika Universitas Gadjah Mada²⁾

ABSTRAK

PENGARUH KOMPOSISI BARIT DAN FLY ASH BATUBARA TERHADAP SEMENTASI LIMBAH RADIOAKTIF. Sementasi merupakan teknik pemadatan limbah radioaktif menggunakan bahan semen. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh dari barit dan abu layang batubara pada kuat tekan dan hasil pelindian pada imobilisasi limbah $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$, juga untuk mendapatkan komposisi terbaik barit-pasir dan semen-fly ash. Variasi fly ash, yaitu 10%, 20%, 30% dan 40% dari total semen yang digunakan, sedangkan komposisi barit yang digunakan adalah 70%, 80%, 90%, dan 100% dari total pasir ditambah barit. Ukuran butir barit dan pasir yang digunakan adalah -40 mesh+70 mesh dan -40 mesh. Faktor air semen yang digunakan adalah 0,3. Benda uji dicetak bentuk silinder berukuran diameter 2,8 cm dan tinggi 5,6 cm. Pemeraman mortar selama 30 hari, kemudian dilakukan uji kuat tekan. Untuk mengetahui laju lindi dilakukan pelindian selama 21 hari pada media pelindi aquades, kadar stronsium yang terlindi dianalisis dengan alat Spektroskopi Serapan Atom (SSA) jenis Hitachi Zeeman 8000. Berdasarkan penelitian, komposisi fly ash dan barit tidak berpengaruh signifikan terhadap kuat tekan mortar. Kuat tekan tertinggi, yaitu $(26,1123 \pm 0,7992) \text{ N/mm}^2$ diperoleh pada komposisi barit 70% dan fly ash 10%. Laju lindi pada hari ke-21 yaitu $4,198 \times 10^{-3} \text{ g.cm}^{-2}.\text{hari}^{-1}$. Hasil uji kuat tekan dan laju lindi pada penelitian ini memenuhi standar dari IAEA.

Kata kunci : fly ash, barit, sementasi, limbah radioaktif cair, uji lindi, kuat tekan.

ABSTRACT

EFFECT OF BARITE AND COAL FLY ASH COMPOSITION TO RADIOACTIVE WASTE CEMENTATION. Cementation is the method of solidifying radioactive waste using cement. This research aims to determine the effect of barite and coal fly ash on compressive strength and leaching results in waste immobilization of $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$, also to get the best composition of barite-sand and cement-fly ash. Fly ash variations are 10%, 20%, 30%, and 40% from total cementitious material, whereas used barite composition 70%, 80%, 90%, and 100% from total sand plus barite. Grain size barite and sand used -40 mesh+70 mesh and -40 mesh. Water to cement ratio used 0,3. The specimen was casted into cylinder with 2.8 cm of diameter and 5.6 cm of height. Curing period during 30 days, then their compressive strength were investigated. To determine the leaching rate of leach carried out for 21 days in the medium of aquades, which leached strontium levels analyzed by Atomic Absorption Spectroscopy (AAS) type Hitachi Zeeman 800. Based on the research, fly ash and barite composition produce no significant effect on compressive strength of mortar. Highest compressive strength $((26,1123 \pm 0,7992) \text{ N/mm}^2)$ obtained in the composition of barite 70% and fly ash 10%. The rate of leach on 21st days is $4,198 \times 10^{-3} \text{ g.cm}^{-2}.\text{hari}^{-1}$. Compressive strength test results and leach test from this research is still compliance with IAEA standards.

Keywords : fly ash, barite, cementation, liquid radioactive waste, leach test, compressive strength test

PENDAHULUAN

Penelitian tentang pengaruh komposisi barit dan abu layang terhadap sementasi ini dilatarbelakangi oleh penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Edi Septriyanto [1] dan Ayu Nur Latifah [2], sehingga penulis menggabungkan penelitian dari Edi Septriyanto [1] dan Ayu Nur Latifah [2] dengan mengombinasikan jenis material, komposisi material, dan media pelindiannya. Untuk itu akan dijelaskan apa itu semen, limbah yang digunakan, barit, dan sementasi di paragraf-paragraf selanjutnya.

Semen portland adalah semen hidrolis yang dihasilkan dengan cara menghaluskan klinker terutama dari silikat-silikat kalsium yang bersifat hidrolis (dapat mengeras jika bereaksi dengan air) dengan gips (*gypsum*) sebagai bahan

tambahan [3]. Pozolan adalah material yang mengandung silika atau alumino silika yang bentuknya halus dan berukuran kecil serta dengan adanya air, campuran pozolan dengan kalsium hidroksida memiliki sifat perekat seperti semen [2]. Pemakaian bahan tambahan pozolan ini mempunyai berbagai tujuan, diantaranya yaitu untuk mengurangi jumlah pemakaian bahan pengikat hidrolis (semen portland) dan memperbaiki mutu campuran mortar semen [4]. Menurut SNI S-15-1990-F tentang spesifikasi abu terbang sebagai bahan tambahan untuk campuran beton, abu batubara (abu layang) digolongkan menjadi 3 jenis, yaitu [5] :

1. Kelas F : Abu terbang (abu layang) yang dihasilkan dari pembakaran batubara jenis *antrasit*, pada suhu 1560°C

2. Kelas C : Abu terbang (abu layang) yang dihasilkan dari pembakaran batu bara jenis lignit atau batubara dengan kadar karbon sekitar 60%. Abu terbang ini mempunyai sifat seperti semen dengan kadar kapur di atas 10%.
3. Kelas N, ialah hasil kalsinasi dari pozolan alam, seperti tanah *diatomice*, *shole*, *tuft*, dan batu apung.

Barit memiliki berat jenis sebesar 4,3-4,6 g/cm³, sehingga termasuk jenis mineral berat. Dengan tingkat kekerasan 3-3,5 barit memiliki tingkat keuletan yang mudah rapuh (*brittle*). Meskipun mengandung logam berat barium, barit secara kimia tidak beracun karena sifatnya yang sangat tidak larut dalam air dan tidak reaktif [1].

Stronsium non radioaktif dan yang radioaktif memiliki kesamaan secara fisik dan kimia. Stronsium-90 memancarkan partikel beta, tanpa radiasi gamma, dan meluruh menjadi yttrium-90 (pemancar beta). Ketika stronsium-90 meluruh mengeluarkan radiasi dan berubah menjadi yttrium-90, dan meluruh kembali menjadi zirconium stabil. Umur paro dari yttrium-90 sebesar 64 jam. Stronsium-90 berada dalam bentuk berbagai senyawa dan mudah menyebar ke lingkungan [6].

Pada umumnya limbah radioaktif dibagi berdasarkan bentuk fisiknya dan tingkat aktivitasnya, diantaranya adalah [9] :

1. Limbah Cair
Kebanyakan berasal dari instalasi pengolahan ulang bahan bakar bekas, seperti limbah cair dari sistem ekstraksi siklus utama pada proses iradiasi bahan bakar. Contoh lain adalah air cucian benda padat yang terkontaminasi cairan zat radioaktif yang sengaja dibuang baik untuk suatu percobaan atau sisa, cairan dari instalasi pengolahan uranium atau pabrik yang menggunakan zat radioaktif.
2. Limbah Gas
Seperti udara dan *aerosol* dari kegiatan tambang uranium. Limbah ini biasanya mengandung radionuklida beterbangan seperti ⁸⁵Kr, ³H, dan ¹³¹I.
3. Limbah Padat
Peralatan bekas dari instalasi pemurnian uranium, peralatan bekas dari penanganan zat radioaktif dan dari peralatan serta struktur yang terkontaminasi.

Limbah radioaktif ini sebelum dilepas ke lingkungan terlebih dahulu dilakukan pengelolaan limbah radioaktif. Salah satu proses pengelolaan limbah radioaktif adalah imobilisasi. Imobilisasi adalah proses mengubah bentuk limbah menjadi bentuk padat untuk mengurangi kemampuan pindah (migrasi) atau penyebaran (dispersi) radionuklida karena proses alamiah selama penyimpanan, pengangkutan, dan

pembuangan. Tujuan imobilisasi adalah agar radionuklida dalam limbah tidak dapat larut atau terekstrak kembali oleh air dan tidak menyebar ke lingkungan [6]. Salah satu metode imobilisasi adalah sementasi. Sementasi adalah proses imobilisasi limbah radioaktif dengan matriks semen untuk membentuk padatan yang stabil agar radionuklida dalam limbah tidak dapat larut sehingga mampu mencegah penyebaran zat radioaktif ke lingkungan. Pada umumnya sementasi digunakan untuk imobilisasi limbah radioaktif cair aktivitas rendah dan menengah yang tidak mengandung aktinida dan radionuklida berumur paro panjang.

Sementasi merupakan salah satu teknik pemadatan limbah radioaktif cair. Pada penelitian sementasi ini dilakukan sedikit perubahan pada komposisi campurannya, yaitu dengan penambahan abu layang batubara dan substitusi antara pasir dan barit. Hal ini dilakukan karena dengan penambahan abu layang diyakini dapat menambah kekuatan tekan dari mortar. Sedangkan alasan substitusi barit dengan pasir adalah dikarenakan keinginan untuk mengetahui pengaruh dari barit tersebut terhadap kuat tekan mortar dan laju lindi mortar. Pemilihan bahan barit karena barit memiliki kemampuan sebagai perisai radioaktif [6] dan memiliki densitas tinggi yang dapat menaikkan nilai kuat tekan mortar [7]. Kualitas dari hasil sementasi ditentukan oleh komposisi bahan penyusun mortar semen. Pada komposisi yang tepat, bahan penyusun tersebut dapat memberikan kontribusi yang baik pada densitas, porositas, dan integritas mortar semen [7]. Abu layang batubara mengandung SiO₂, Al₂O₃, P₂O₅, dan Fe₂O₃ yang cukup tinggi sehingga abu layang batubara memenuhi kriteria sebagai bahan yang memiliki sifat semen/pozzolan [8]. Suatu jumlah tertentu air diperlukan untuk memberi aksi kimiawi dalam pengerasan beton, kelebihan air memudahkan pekerjaan tetapi menurunkan kekuatan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh dari barit dan abu layang batubara pada kuat tekan dan hasil pelindian pada imobilisasi limbah Sr(NO₃)₂, juga untuk mendapatkan komposisi terbaik barit-pasir dan semen-abu layang.

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi lebih jelas akan pengaruh dari abu layang dan barit pada komposisi sementasi limbah radioaktif cair.

METODOLOGI

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain

1. Semen Portland tipe 1.
2. Pasir -40 mesh, barit -40/+70 mesh, abu layang batubara PLTU Cilacap.

3. Air.
4. Aquades.
5. Kristal $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ dengan spesifikasi:
 - Kemurnian 99%
 - Pro analisis (pa)
 - $M = 211,63 \text{ g/mol}$
 - Buatan Merck KGaA Jerman

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah

1. Gelas Beker 500 ml dan gelas ukur 100 ml
2. Pipet 10 ml dan Pipet pump
3. Corong 60°
4. Neraca digital dan neraca ohaus
5. Spatula
6. Bejana tempat pengadukan campuran
7. Pengaduk adonan
8. *Ball mill*
9. Ayakan 40 mesh, 50 mesh, 70 mesh, dan 100 mesh
10. Masker dan sarung tangan
11. Botol, tali kenur, dan potongan kardus
12. Pot polietilen dan pipa paralon
13. Gunting, lakban, dan amplas
14. Mesin uji tekan *Control Testing Machine*
15. SSA jenis Hitachi Zeeman 8000

Pengambilan data untuk dilakukan uji tekan dan uji lindi pada setiap variasi abu layang dan barit adalah 3 sampel mortar pada setiap variasi untuk uji tekan dan 1 sampel mortar yang memiliki kuat tekan terbaik untuk dilakukan uji lindi.

Data yang didapat dari uji tekan adalah berupa nilai beban maksimum. Nilai beban maksimum dari masing-masing mortar dikonversi terlebih dahulu menjadi nilai kuat tekan. Perhitungan kuat tekan menggunakan persamaan:

$$\sigma_t = \frac{F}{A} \quad (1)$$

dengan,

σ_t = kuat tekan (N/mm^2)

F = beban maksimum (N)

A = luas penampang benda uji (mm^2)

Hasil kuat tekan dari setiap variasi dihitung nilai reratanya. Nilai rerata tersebut kemudian dibuat grafik hubungan antara nilai kuat tekan dengan perubahan barit dan grafik hubungan antara nilai kuat tekan dengan penambahan abu layang batubara. Hasil grafik tersebut dianalisis untuk menemukan pengaruh dari barit dan abu layang tersebut terhadap nilai kuat tekannya.

Pengujian uji lindi pada sampel didapatkan data berupa nilai absorbansi dari cuplikan. Nilai absorbansi ini kemudian dikonversi menjadi nilai laju lindi. Untuk mendapatkan nilai laju lindi terlebih dahulu dilakukan pengujian larutan standar stronsium dengan konsentrasi 10 ppm, 15 ppm, 20 ppm, dan 25 ppm menggunakan *Atomic Absorption Spectrometer* (AAS) untuk mendapatkan nilai absorbansinya. Dibuat grafik absorbansi larutan standar, lalu dilakukan regresi untuk mendapatkan persamaan regresinya yang akan digunakan untuk mendapatkan hubungan antara absorbansi dengan nilai konsentrasi. Selanjutnya dapat diketahui nilai konsentrasi dari masing-masing cuplikan.

Untuk menentukan nilai laju lindi berdasarkan konsentrasi larutan menggunakan persamaan:

$$R = \frac{C}{C_0} \times \frac{W}{S \times t} \quad (2)$$

$$S = (0,5\pi D^2) + (\pi Dh) \quad (3)$$

dengan,

R = laju lindi ($\text{g.cm}^{-2}.\text{hari}^{-1}$)

C = konsentrasi pada waktu t (ppm)

C_0 = konsentrasi awal sebelum diambil cuplikan (ppm)

W = berat mortar (gram)

S = luas permukaan cuplikan (cm^2)

t = lama waktu pelindian (hari).

D = diameter mortar (cm)

h = tinggi mortar (cm)

Langkah berikutnya adalah membuat grafik hubungan antara laju lindi dengan hari. Analisis data kuat tekan dan laju lindi untuk mendapatkan kesimpulan secara umum dan menyeluruh.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menghasilkan data seperti yang tertera pada Tabel 1. Kuat tekan rerata tertinggi terdapat pada komposisi 70 % barit dan 10 % abu layang, yaitu $26,1123 \pm 0,7992 \text{ N/mm}^2$. Sedangkan kuat tekan rerata terendah pada

komposisi 100 % barit dan 30 % abu layang, yaitu $17,4947 \pm 4,2059 \text{ N/mm}^2$. Nilai kuat tekan terendah pada penelitian ini masih sesuai dengan standar IAEA.

Tabel 1. Kuat tekan rerata mortar

Abu Layang	Kuat Tekan Rerata (N/mm^2)			
	100 % Barit	90 % Barit	80 % Barit	70 % Barit
0 %	$20,3499 \pm 1,5908$	-	-	-
10 %	$18,0138 \pm 2,7258$	$24,2434 \pm 4,5734$	$22,8937 \pm 4,5379$	$26,1123 \pm 0,7992$
20 %	$22,5303 \pm 3,0611$	$21,2844 \pm 4,0171$	$19,3117 \pm 2,4723$	$22,9975 \pm 1,6653$
30 %	$17,4947 \pm 4,2059$	$20,0904 \pm 3,3728$	$22,2188 \pm 3,6535$	$20,4019 \pm 3,3728$
40 %	$21,7516 \pm 0,1798$	$20,1942 \pm 2,8562$	$23,7243 \pm 5,5508$	$19,0002 \pm 2,0366$

Kuat tekan yang didapatkan dari penambahan pozolan abu layang ini akan mengalami penurunan. Pengalaman selama penelitian didapatkan bahwa semakin banyak pozolan (abu layang) yang ditambahkan, proses pengadukan menjadi semakin mudah. Semakin mudah dalam pengadukan menjadikan proses homogenisasi menjadi lebih baik. Akan tetapi, pengadukan yang lebih mudah juga mengindikasikan bahwa kadar air di dalam adonan juga semakin banyak. Hal ini menyebabkan nilai kuat tekan menjadi turun.

Hal tersebut dilihat pada sudut pandang abu layang pada mortar. Sudut pandang yang kedua adalah kuat tekan dilihat dari perubahan komposisi barit pada mortar. Komposisi 10 % dan 20 % abu layang menunjukkan kuat tekan tertinggi terdapat pada komposisi 70 % barit, sedangkan pada komposisi 30 % dan 40 % abu layang nilai kuat tekan tertinggi terdapat pada komposisi 80 % barit. Hal tersebut dikarenakan tidak meratanya penampang mortar sehingga mempengaruhi pembacaan kuat tekan pada mortar dan homogenisasi pada pengadukan adonan mortar. Pengadukan adonan yang tidak merata mengakibatkan bahan tertentu mengumpul di salah satu bagian tertentu pada mortar, sehingga nilai kuat tekan sangat dipengaruhi oleh bagian mortar yang mengalami pusat pembebanan. Terjadinya ketidamerataan adonan dapat diakibatkan oleh densitas dari

bahan pengisi yang berbeda. Bahan pengisi pada penelitian ini adalah substitusi pasir dengan barit. Nilai densitas barit yang jauh lebih besar dibandingkan densitas pasir mengakibatkan sulitnya homogenisasi antara pasir dan barit meskipun rentang ukuran butirnya tidak berbeda jauh. Nilai densitas dari masing-masing bahan penyusun mempengaruhi nilai densitas mortar.

Berdasarkan hasil *two-way* ANOVA diperoleh hasil perhitungan yang dapat disajikan seperti pada Tabel 2 berikut.

Berdasarkan tabel analisis *two-way* ANOVA di atas, *p-value* dari variasi abu layang dan komposisi barit lebih besar dari level toleransi (α) = 5% . Nilai *p* interaksi juga lebih besar dari level toleransi 5%. Disimpulkan kedua variasi tersebut tidak berpengaruh signifikan terhadap kuat tekan dan tidak ada pengaruh interaksi antara barit dan abu layang terhadap kuat tekan mortar.

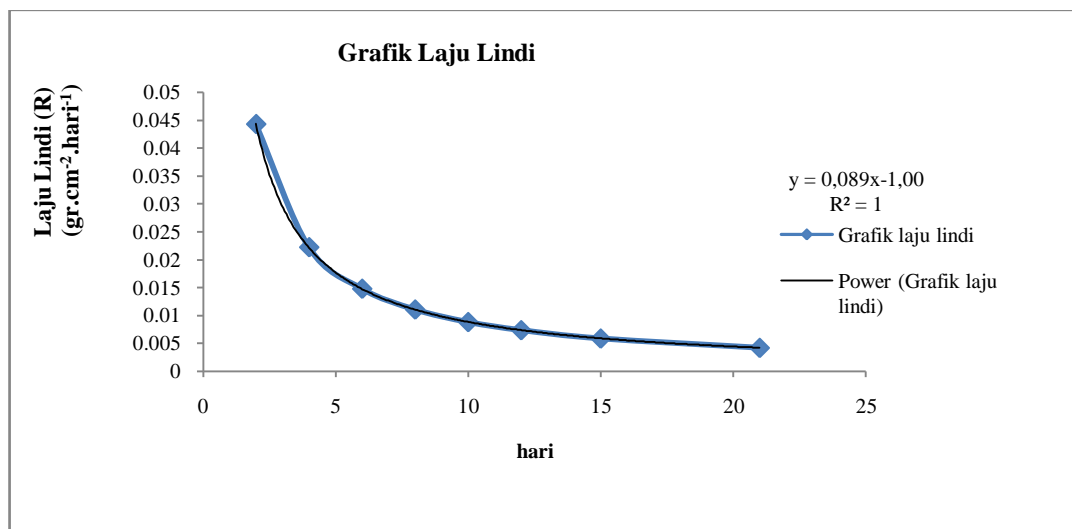
Nilai kuat tekan terendah adalah $17,4947 \pm 4,2059$, sudah memenuhi standar yang diterapkan IAEA, yaitu $2,5 \text{ N/mm}^2$ pada umur 28 hari. Standar ini adalah nilai kuat tekan mortar yang telah dibebani oleh limbah. Mortar yang digunakan dalam uji lindi adalah mortar yang memiliki nilai kuat tekan tertinggi karena untuk memenuhi tujuan penelitian ini, yaitu menentukan komposisi campuran yang terbaik. Hasil data laju lindi divisualisasikan dengan Tabel 3 dan Gambar 1.

Tabel 2. Hasil keluaran *two-way* ANOVA untuk kuat tekan

Variasi	F	p-value	Hasil
Abu layang	1,38	0,267	H ₀ diterima, H ₁ ditolak
Barit	1,08	0,372	H ₀ diterima, H ₁ ditolak
Interaksi	1,64	0,144	H ₀ diterima, H ₁ ditolak

Tabel 3. Hasil Uji Lindi

Hari	Laju Lindi (R) (g.cm ⁻² .hari ⁻¹)
2	0,04424367
4	0,02221329
6	0,01477998
8	0,01106092
10	0,008816
12	0,00736111
15	0,00586578
21	0,0041981



Gambar 1. Laju lindi mortar

Terlihat bahwa laju lindi mortar semakin lama semakin menurun. Hasil uji lindi penelitian ini menghasilkan laju lindi pada hari ke- 21 adalah $4,198 \times 10^{-3} \text{ g.cm}^{-2}.\text{hari}^{-1}$ dan pada hari ke- 91 adalah $0,978 \times 10^{-3} \text{ g.cm}^{-2}.\text{hari}^{-1}$ (hasil ekstrapolasi).

Pengujian untuk kuat tekan dan laju lindi memiliki keterikatan sehingga diperlukan kecermatan di dalam pemilihan mortar yang akan dilakukan uji lindi untuk dapat memenuhi tujuan awal penelitian. Penelitian ini melakukan uji lindi pada mortar yang memiliki kuat tekan tertinggi. Mortar yang memiliki nilai kuat tekan

tertinggi dimungkinkan juga memiliki nilai laju lindi yang rendah. Hal ini dikarenakan nilai kuat tekan yang tinggi memiliki kemungkinan jumlah pori pada mortar yang lebih sedikit. Banyaknya pori yang terdapat pada mortar akan mengurangi nilai kuat tekan mortar. Selain itu, banyaknya pori pada mortar juga akan mempengaruhi nilai laju lindi. Mortar yang memiliki pori yang lebih banyak dapat memudahkan pelindi (aquades) masuk ke dalam mortar kemudian kontak dengan limbah $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ dan mengeluarkan limbah dari padatan mortar dan mengontaminasi media pelindi. Banyaknya $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ yang keluar dari mortar akan menaikkan nilai laju lindi.

Hasil uji lindi masih sesuai dengan standar laju lindi yang ditetapkan IAEA, yaitu $(1,7 \times 10^{-1} - 2,50 \times 10^{-4}) \text{ g.cm}^{-2}.\text{hari}^{-1}$ [10].

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan hasil penelitian, maka dapat disimpulkan bahwa :

1. Komposisi campuran abu layang-semen dan campuran barit-pasir tidak berpengaruh terhadap kuat tekan mortar.
2. Interaksi antara komposisi campuran abu layang-semen dan komposisi campuran barit-pasir tidak memberikan pengaruh terhadap kuat tekan mortar.
3. Kuat tekan mortar tertinggi $26,1123 \pm 0,7992 \text{ N/mm}^2$ pada komposisi 70 % barit dan 10 % abu layang dan kuat tekan terendah $17,4947 \pm 4,2059 \text{ N/mm}^2$ pada komposisi 100 % barit dan 30 % abu layang.
4. Laju lindi pada hari ke-21 adalah $4,1981 \times 10^{-3} \text{ g.cm}^{-2}.\text{hari}^{-1}$.
5. Hasil kuat tekan dan laju lindi masih memenuhi standar yang ditetapkan IAEA, yaitu $2,5 \text{ N/mm}^2$ untuk kuat tekan dan laju lindi $(1,7 \times 10^{-1} - 2,50 \times 10^{-4}) \text{ g.cm}^{-2}.\text{hari}^{-1}$

Saran yang akan diberikan pada penelitian ini adalah

1. Perlu dilakukan penelitian dengan jenis pozolan lain seperti *silica fume*.
2. Perlu diperhatikan lagi komposisi air dalam adonan jika dilakukan penambahan pozolan.
3. Pengadukan adonan harus lebih diperhatikan agar proses homogenisasi lebih baik.
4. Dilakukan uji lindi pada mortar yang akan diuji tekan untuk mengetahui kuat tekan mortar setelah dilakukan pelindian.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis ucapkan terima kasih kepada dosen-dosen Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika Universitas Gadjah Mada yang telah memberikan dasar-dasar keilmuan di bidang nuklir dan teknik secara umum, khususnya kepada sesama penulis Bapak Susetyo Hario Putero dan Bapak Kusnanto, yang tak lain dan tak bukan juga merupakan dosen Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika Universitas Gadjah Mada. Terima kasih juga kepada staf, laboran, dan penjaga di Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika Universitas Gadjah Mada yang banyak membantu penulis dalam menyelesaikan penelitian ini. Tidak lupa juga, penulis ucapkan terima kasih kepada rekan-rekan kerja di PTLR, khususnya Bidang Keselamatan Kerja dan Operasi, yang telah mendorong penulis untuk membuat makalah ilmiah ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. Edi Septriyanto. *Pengaruh Variasi Jenis Mineral dan Ukuran Butir Bahan Pengisi Terhadap Hasil Sementasi Limbah Radioaktif Cair pada Lingkungan Bergaram*. Skripsi, Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 2010.
2. Ayu Nur Latifah. *Pengaruh Variasi Volume Abu Sekam Padi dan Limbah Cair Pada Sementasi Limbah Radioaktif Cair*. Skripsi, Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 2010.
3. SNI S-04-1989, Badan Standar Nasional, Indonesia, 1989.
4. Taufik. *Pengaruh Penambahan Tumbukan Batu Bata Terhadap Kuat Tekan dan Kuat Aus Mortar Sebagai Bahan Dasar Paving Block*. Skripsi, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, UNES, Semarang, 2005.
5. Kardiyono Tjokrodinuljo. *Diktat Mata Kuliah Teknologi Beton*. Diktat. Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 1996.
6. Susetyo Hario Putero. *Diktat Mata Kuliah Pengelolaan Limbah Radioaktif*. Diktat, Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 2006.
7. Muhammad Yusuf. *Pengaruh pH Limbah pada Sementasi Limbah Radioaktif di Lingkungan Bergaram*.

- Skripsi, Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 2010.
8. Fauzi Rahmanullah. *Material dan Konstruksi: Agregat kasar*. Jurusan Pendidikan Arsitektur. Diakses dari www.upi.edu, 23 Desember 2010.
 9. Pusat Pendidikan dan Pelatihan BATAN. *Ketentuan Keselamatan Radiasi. Pelatihan Proteksi Radiasi Bagi Pegawai Baru*, BATAN, 2008.
 10. Siswanto Hadi, Mardini, dan Suparno. *Karakterisasi Kualitas Lmbah Hasil Sementasi*. Laporan Penelitian, Hasil Penelitian dan Kegiatan PTLR Tahun 2006, PTLR-BATAN, Tangerang, 2006.

KAJIAN PENGOLAHAN LIMBAH RADIOAKTIF PADAT DARI OPERASI REAKTOR *HIGH TEMPERATURE REACTOR* 10 MW

Mirawaty, Yuli Purwanto

Pusat Teknologi Pengolahan Limbah – BATAN

mirawaty@batan.go.id

ABSTRAK

KAJIAN PENGOLAHAN LIMBAH RADIOAKTIF PADAT DARI OPERASI REAKTOR *HIGH TEMPERATURE REACTOR* 10 MW. Operasi reaktor *High Temperature Reactor* 10 MW (HTR-10) akan menimbulkan limbah radioaktif yang harus dikelola dengan baik agar tidak mencemari lingkungan. Salah satu limbah yang ditimbulkan adalah limbah padat berupa debu grafit, padatan terkontaminasi, dan drum filter. Kajian ini akan mengkaji pengelolaan limbah radioaktif padat yang dihasilkan dari operasi reaktor HTR-10. Beberapa penelitian yang telah dilakukan untuk pengolahan limbah grafit dengan proses disposal langsung setelah dikemas dengan wadah yang sesuai, disposal setelah di insenerasi, disposal dengan pengolahan secara kimia, kondisioning, dan pengemasan yang tepat. Pengolahan limbah grafit ini harus memperhatikan adanya energi wigner, jenis grafit, ukuran wadah dan berat, tingkat dosis pada kemasan, keluaran panas dan kontaminasi permukaan, dan pelepasan radioaktif pada kondisi normal (saat penanganan, pengangkutan dan disposal) atau kecelakaan. Sedangkan untuk limbah filter dan limbah padat terkontaminasi pengolahannya dapat dilakukan dengan proses kompaksi dan sementasi.

Kata Kunci : *High Temperature Reactor* 10 MW, grafit, limbah radioaktif padat, pengolahan

ABSTRACT

The study of a solid radioactive waste treatment from the operation of a 10 MW high temperature reactor. An operation of a 10MW high temperature reactor (HTR-10) creates a solid radioactive waste which has to be treated to avoid environmental pollution. Several solid wastes that are created during the operation are dust graphite, contaminated solids and filter drums. The current study investigates of the solid radioactive waste treatment that produces from the operation of HTR-10. Several studies treated the graphite waste using direct disposal after suitable packaging, disposal after incineration, disposal after chemical treatment, conditioning, and proper packaging. The graphite waste treatments should consider wigner energy presence, the graphite type by the container size and weight, the dose level within the packaging, the heat output and surface contamination, and the radioactive releases in the normal condition, which are during the handling, transport and disposal, or accident. As for filter waste and contaminated solid waste processing can be done by compaction and cementation process.

Keywords : *High Temperature Reactor* 10 MW, graphite, solid radioactive waste, treatment

PENDAHULUAN

Reaktor *High Temperature Reactor* 10 MW merupakan reaktor dengan temperatur tinggi yang mempunyai daya termal 10 MW. Reaktor ini yang akan diaplikasikan dalam pembangunan Reaktor Daya Eksperimen (RDE) sebagai salah satu program dalam renstra BATAN tahun 2015-2019. RDE yang akan dibangun adalah reaktor dengan temperatur tinggi dengan daya termal 10 MW dan menggunakan pendingin gas (*High Temperature Reactor* 10 MW thermal, HTR-10). Adanya pembangunan RDE akan ditimbulkan limbah radioaktif yang harus dikelola karena merupakan salah satu bagian penting dari keselamatan operasi reaktor tersebut dan lingkungan. Limbah yang ditimbulkan salah satunya limbah radioaktif padat yang berupa debu grafit, padatan terkontaminasi, dan drum filter. Material grafit

berfungsi sebagai moderator pada bahan bakar kernel dan sebagai struktur penyangga dari partikel bahan bakar TRISO.

Kajian ini akan mengkaji pengelolaan limbah radioaktif padat yang dihasilkan dari operasi RDE HTR-10 terutama limbah grafit. Berdasarkan IAEA-TECDOC-1521 pengolahan limbah grafit dan dilakukan dengan proses insenerasi (*furnance, fluidized bed, laser*) dan enkapsulasi menggunakan bahan matriks (semen, aspal, polimer, gelas) [1,2]. Beberapa Negara melakukan pengolahan limbah radioaktif grafit dengan cara daur ulang seperti yang dilakukan di Amerika dan Jerman, namun dihentikan karena aspek non-proliferasi [3,4,5]. Jerman juga pernah melakukan pembuangan langsung limbah radioaktif grafit ke tambang garam, namun memerlukan tempat pembuangan yang besar karena volumenya. Proses immobilisasi

menggunakan bahan matrik gelas juga pernah dilakukan untuk limbah radioaktif grafit karena efisien untuk limbah dari produksi fisi dan aktinida. Matrik gelas telah banyak digunakan di beberapa negara seperti Prancis, Jerman, Belgia, Inggris, Amerika Serikat, Jepang, Rusia [3,6]. Penelitian pemisahan TRISO dari grafit juga pernah dilakukan namun mempunyai kelemahan seperti biaya yang tinggi, kegagalan lapisan, pemisahan yang parsial, kompleksitas TRISO yang terpisah, juga perlu memperhatikan panas yang ditimbulkan[1,7,8].

Reaktor Daya Eksperimen *High Temperature Reactor 10 MW (RDE HTR-10)*

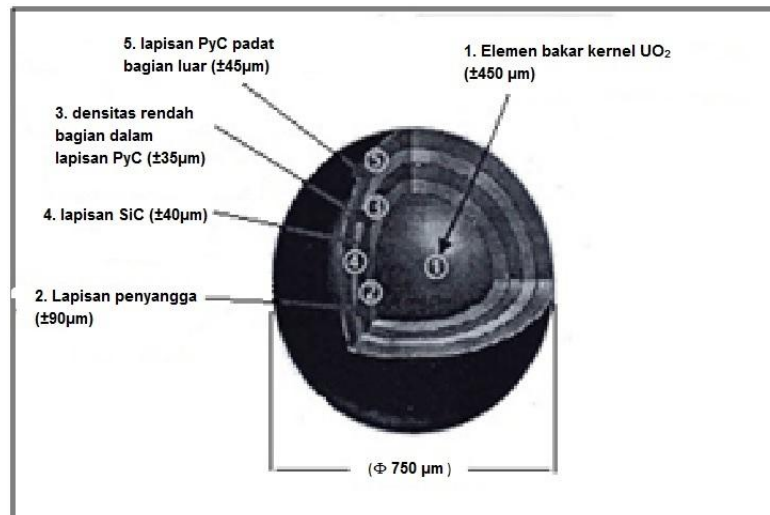
RDE HTR-10 merupakan reaktor dengan daya termal 10 MW, daya listrik 2,5 MW dengan bahan bakar U-235 pengkayaan 17% dan menggunakan pendingin primer gas helium yang bertekanan 3,5 atm[9]. Reaktor HTR-10 mempunyai keunggulan efisiensi termal tinggi, secara keamanan mempunyai *power density* yang

rendah, dan mempunyai kapasitas termal yang besar pada inti. Reaktor ini telah banyak dikembangkan di Jerman, Cina, Rusia, Afrika Selatan, Amerika Serikat, Inggris dan Jepang [3]. Reaktor HTR-10 menggunakan bahan bakar *pebbel* yang mengandung kernel tipe termal dengan struktur dan konstruksi partikel berlapis triso (*triso coated particle*), berikut deskripsi bahan bakar *pebbel* sebagai berikut [9]:

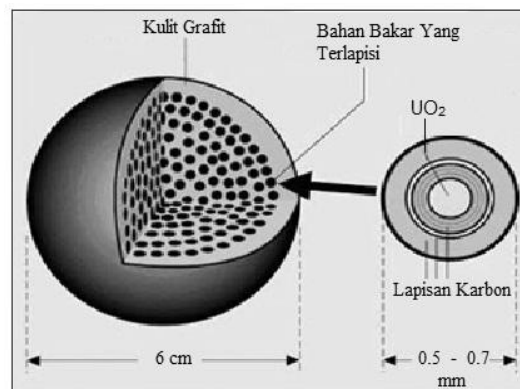
1. Partikel berlapis triso terdiri dari 5 (lima) lapisan seperti ditunjukkan pada **Gambar 1 dan Tabel 1**.
2. Partikel berlapis triso sebanyak 8.335 digabungkan dalam elemen *pebbel* (bentuk bola) dengan diameter 6 cm
3. Elemen *pebbel* mengandung 5 gram *heavy metal* (HM) yang merupakan campuran dari U-234, U-235, dan U-238
4. Semua partikel-partikel tersebut didalam *pebbel* yang terimobilisasi dengan matriks grafit seperti ditunjukkan pada Gambar 2.

Tabel 1. Lapisan yang terdapat dalam Triso [9]

Lapisan	Keterangan
Pertama	- Berdiameter 450 μm - Bagian tengah : bahan bakar kernel UO_2 yang dilapisi moderator keramik dan grafit
Kedua	- Tebal 90 μm - lapisan <i>buffer</i> dari grafit berpori yang mempunyai fungsi untuk penyerapan unsur radioaktif hasil fisi yang lepas dari lapisan pertama - berfungsi untuk mengakomodasi pembengkakan kernel yang disebabkan pemuaiannya karena kenaikan suhu sampai 1600 $^{\circ}\text{C}$
Ketiga	- Tebal 35 μm - Terbuat dari karbon pirolitik - Berfungsi sebagai lapisan bejana penerima tekanan dari lapisan sebelumnya
Keempat	- Tebal 40 μm - Terbuat dari silisium karbida - Berfungsi sebagai penahan keselamatan unsur radioaktif hasil fisi yang lepas dari lapisan kedua dan menetrasi lapisan ketiga
Kelima	- Tebal 45 μm - dibuat dari grafit pirolitik berfungsi sebagai pertahanan akhir dari bahan bakar



Gambar 1. Bahan Bakar Kernel Partikel Berlapis Triso (*Triso Coated Particle*) [9,10,11]



Gambar 2. Elemen *Pebbel* Yang Berisi Partikel Triso Dan Terimobilisasi dalam Matriks grafit [9,10,11]

Kapasitas teras reaktor HTR-10 bervolume 5 m³, menggunakan 27.000 buah *pebbel* yang terdiri dari 14.310 elemen *pebbel* kernel (sebagai bahan bakar) dan 12.690 *pebbel* grafit (sebagai moderator) [9,12]. Pendingin yang digunakan adalah gas helium yang akan menghasilkan gas hasil fisi, partikel debu grafit, gas tritium dan karbon-14 hasil aktivasi. Melalui sistem purifikasi gas helium dapat menghilangkan debu grafit, humiditas dan unsur-unsur radioaktifnya. Digunakan juga filter karbon aktif untuk menangkap gas Yodium dan gas mulia sekaligus untuk penundaan gas mulia umur pendek [12].

Limbah yang ditimbulkan dari operasi reaktor RDE

Limbah radioaktif padat tingkat rendah dan sedang yang ditimbulkan dari operasi reaktor RDE antara lain debu grafit dari purifikasi gas helium yang tertangkap oleh filter, padatan yang terkontaminasi dari kegiatan operasional dan

perawatan, drum filter dari fasilitas dekontaminasi, *pebbel* moderator grafit yang mengalami kerusakan (retak, pecah, dll) juga grafit bekas dari *carbon brick* konstruksi sipil teras reaktor yang secara berkala (setiap 20 tahun) mengalami pergantian. Beberapa filter yang menjadi limbah radioaktif padat antara lain *bag filter* untuk menangkap debu grafit dalam kegiatan purifikasi gas helium, filter karbon aktif untuk penangkapan gas (iodine, karbon, kripton, dan xenon), pre-filter, filter *High Efficiency Particulate Air* (HEPA), dan *glass fiber paper* dari sistem *VAC-Off Gas* [9,13]. Perkiraan jumlah limbah radioaktif padat yang ditimbulkan dari operasi reaktor HTR-10 seperti ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Jenis dan jumlah limbah padat dari operasi HTR-10 [9, 14]

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.	Filter karbon aktif bekas	LRTR	5 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	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.
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	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.	<i>Pebbel</i> 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

PEMBAHASAN

Limbah debu moderator grafit ditimbulkan dari sistem purifikasi gas helium yang berfungsi sebagai penghilang kontaminan kimia dan partikel debu grafit dari pendingin primer. Berdasarkan perhitungan seperti pada dokumen teknis jumlah limbah debu grafit yang ditimbulkan dari operasi RDE HTR-10 mencapai 160 kg/tahun, dengan kandungan kontaminan yodium, karbon, dan beberapa gas mulia (Kripton, Xenon) seperti ditunjukkan pada Tabel 2. Limbah ini dikategorikan sebagai limbah radioaktif tingkat rendah yang dapat diolah dengan beberapa opsi. Pengolahan limbah tersebut yang dapat digunakan dengan proses insenerasi, proses imobilisasi langsung dan dapat juga dilakukan pra pengolahan sebelum imobilisasi (proses termal, kimia, pirolisis, pelapisan dan penjuhan) [2,15,16].

Pengolahan limbah debu grafit dengan proses insenerasi dapat mereduksi volume dengan rasio grafit terhadap debu sekitar 160 dan perlu diperhatikan kemungkinan adanya lepasan dari C-14, Cl-36, dan residu tritium yang mempunyai waktu paro panjang [16]. Menghindari adanya lepasan tersebut diperlukan adanya filter yang terdiri dari pre-filter, *back filter*, dan HEPA filter sebelum dilepas ke lingkungan [15,16,17]. Pengolahan dengan proses imobilisasi langsung dapat menggunakan bahan matriks semen, semen yang dimodifikasi, polimer, resin, bitumen, gelas [9,16,18]. Pada proses imobilisasi perlu diperhatikan

kemungkinan terjadinya korosi galvanik. Sedangkan proses imobilisasi untuk limbah grafit yang terkontaminasi uranium dan aktinida dilakukan dengan proses *self propagating high temperature synthesis* (SHS) yang pernah diusulkan oleh federasi Rusia [2].

Proses pra-pengolaahn juga dapat dilakukan sebelum proses imobilisasi dengan proses secara termal dan kimia untuk menghilangkan C-14 [16]. Proses secara termal dilakukan pemanasan tanpa mengoksidasi sebagian besar grafit, sehingga terjadi gasifikasi grafit dimana atom karbon bereaksi dengan oksigem membentuk gas CO_x [16, 19-22]. Proses secara kimia dilakukan dengan mendekontaminasi lapisan grafit dan menghancurkan bahan pengikat menggunakan bahan kimia seperti asam mineral, larutan alkali, detergen. Proses secara kimi juga dapat dikombinasikan dengan teknologi elektrokimia atau grafit mikro-oksidasi [16,23,24]. Proses pirolisis dilakukan dengan pemanasan pada temperatur tinggi, dimana limbah diubah menjadi hidrogen (H), karbon monoksida (CO) dan produk gas dioksidasi lebih lanjut dengan oksigen tambahan sehingga menghasilkan produk yang tidak berbahaya, karbon dioksida (CO₂) dan air (H₂O) [26]. Proses pelapisan dan penjuhan dilakukan untuk mengungkung limbah. Proses pelapisan dilakukan dengan melindungi grafit dari oksidasi radiolitik dengan lapisan silica, sedangkan penjuhan dilakukan dengan menutupi lapisan permukaan dari limbah dengan lapisan tipis menggunakan bahan

penjenuhan seperti *ultra-fine grouting*, semen, bitumen, polimer. Pengolahan limbah grafit dengan imobilisasi dan berkonsentrasi pada proses penjenuhan telah dikembangkan di Perancis [16, 25].

Limbah filter yang ditimbulkan dari operasi reaktor HTR-10 salah satunya ditimbulkan dari proses purifikasi yang digunakan untuk menghilangkan debu grafit, humiditas dan unsur-unsur radioaktif. Jenis filter dari proses purifikasi antara lain *bag filter*, pre-filter, HEPA filter, dan filter karbon aktif. Jenis *bag filter* digunakan untuk menghilangkan debu grafit yang mengandung tritium, karbon-14 dan unsur radioaktif hasil fisi. Filter karbon aktif dalam sistem purifikasi digunakan untuk menangkap gas yodium dan gas mulia, juga untuk menunda peluruhan gas mulia yang berumur paro pendek [9]. Limbah filter juga ditimbulkan dari sistem VAC dan *Off Gas* berupa limbah pre-filter jenis *glass fiber paper*, filter karbon aktif dan HEPA. Filter-filter tersebut digunakan untuk menarik udara dari peralatan terkontaminasi bahan kimia dan radioaktif yang terdapat dalam gedung fasilitas. Udara terkontaminasi akan disaring terlebih dahulu dengan pre-filter jenis *glass fiber paper* yang kemudian akan disaring lagi dengan filter karbon aktif dan HEPA melalui proses dehumidifikasi, absorpsi, dan filtrasi, selanjutnya udara dilepas melalui cerobong. Fasilitas dekontaminasi juga menimbulkan limbah padat berupa drum filter yang mengandung kontaminan Cs-137 dan Sr-90.

Perkiraan jumlah limbah *bag filter* bekas sebanyak 10 m³/tahun, HEPA filter sebanyak 0,2 m³/tahun dengan asumsi umur ekonomis nya 2-3 tahun, limbah filter karbon aktif bekas sebanyak 5 kg/tahun, dan pre-filter jenis *glass fiber paper* sebanyak 10 m³/tahun [9]. Limbah filter dari sistem purifikasi dan sistem VAC-*Off Gas* mengandung kontaminan yodium, karbon, dan beberapa gas mulia (Krypton, Xenon), sedangkan dari fasilitas dekontaminasi mengandung kontaminan Cs-137 dan Sr-90 [13]. Pengolahan limbah berupa filter dilakukan dengan proses kompaksi untuk memperkecil volume sehingga mempermudah untuk proses pengolahan selanjutnya. Setelah proses kompaksi dilakukan imobilisasi menggunakan bahan matrik semen untuk mempermudah proses penyimpanannya [9].

Kegiatan operasional dan perawatan reaktor juga menimbulkan limbah padat terkontaminasi yang berupa sarung tangan, kertas, kain dan pakaian. Limbah padat ini mengandung kontaminan Cs-137 dan Sr-90. Pengolahannya dapat dilakukan dengan proses kompaksi untuk memperkecil volume, dan selanjutnya untuk mempermudah penyimpanan

diimobilisasi menggunakan bahan matrik semen [9].

Limbah pebel moderator grafit ditimbulkan dari pebel yang digunakan mengalami rusak seperti retak atau pecah dan diklasifikasikan sebagai limbah radioaktif padat tingkat sedang. Perkiraan jumlah limbah yang ditimbulkan sebanyak 4.230 elemen per tahun dengan kandungan radionuklida dari produk fisi dan aktivasi [9]. Sedangkan limbah grafit (*carbon brick*) ditimbulkan karena konstruksi sipil teras reaktor yang secara berkala diganti setiap 20 tahun. Limbah ini ditimbulkan sebanyak 23,4 m³/20 tahun dengan kandungan radionuklida dari produk fisi dan aktivasi [9].

Limbah pebel moderator grafit dan grafit (*carbon brick*) merupakan grafit dalam teras reaktor yang telah teriradiasi neutron sehingga mengalami perubahan karakterisasi fisiknya. Limbah ini mengandung *energi wigner* yang besar dan panas mencapai 350°C [2, 15]. *Energi wigner* merupakan selisih panas pembakaran grafit teriradiasi dan grafit yang tidak teriradiasi [9]. Pendekatan pengolahan *energi wigner* dengan mencampur grafit dengan bahan lain atau dengan grafit dalam jumlah yang lebih rendah dari yang tersimpan [16]. Pengelolaan limbah *energi wigner* dapat dilakukan dengan proses gasifikasi menggunakan *superheated steam* yang bersuhu 600-700°C untuk pembentukan hidrogen dan CO₂. Sehingga untuk pengolahan limbah pebel moderator grafit dan grafit (*carbon brick*) perlu diperhatikan adanya *energi wigner* dan selanjutnya dapat disimpan di tempat penyimpanan sementara yang khusus dengan menjaga suhu lingkungannya [9]. Beberapa hal yang harus di perhatikan dalam pengolahan limbah grafit antara lain jenis grafit, ukuran wadah dan berat, tingkat dosis pada kemasan, keluaran panas dan kontaminasi permukaan, dan pelepasan radioaktif pada kondisi normal (saat penanganan, pengangkutan dan disposal) atau kecelakaan [16,17].

KESIMPULAN

Hasil pengkajian ini pengolahan limbah padat dari operasi reaktor HTR-10 berupa grafit dapat dilakukan dengan proses disposal langsung setelah dikemas dengan wadah yang sesuai, disposal setelah di insenerasi (diabukan), disposal dengan pengolahan secara kimia, kondisioning, pengemasan yang tepat. Dengan memperhatikan adanya energi wigner, jenis grafit, ukuran wadah dan berat, tingkat dosis pada kemasan, keluaran panas dan kontaminasi permukaan, dan pelepasan radioaktif pada kondisi normal (saat penanganan, pengangkutan dan disposal) atau kecelakaan. Limbah yang

berupa filter dan limbah padat terkontaminasi pengolahannya dapat dilakukan dengan proses kompaksi dan sementasi. Pengolahan limbah pebel moderator grafit dan grafit (*carbon brick*) perlu diperhatikan adanya *energi wigner* dan selanjutnya dapat disimpan di tempat penyimpanan sementara yang khusus dengan menjaga suhu lingkungannya

DAFTAR PUSTAKA

1. Fabrice Guittonneau, Abdesselam Abdelouas, Bernd Grambow, *HTR Fuel Waste Management: TRISO separation and acid-graphite intercalation compounds preparation*, Journal of Nuclear Materials 407, (2010), 71–77,
2. IAEA, *Characterization, treatment and conditioning of radioactive graphite from decommissioning of nuclear reactors*, IAEA-TECDOC-1521, Vienna, Australia, (2006)
3. Abdesselam Abdelouas, Samuel Noirault, Bernd Grambow, *Immobilization of inert TRISO-coated fuel in glass for geological disposal*, Journal of Nuclear Materials 358 (2006) 1–9
4. H. Nickel, H. Nabielek, G. Pott, A.W. Mehner, *Long time experience with the development of HTR fuel elements in Germany*, Nuclear Engineering and Design., 217 (1–2) (2002), pp. 141-151
5. K. Sawa, S. Ueta, *Research and development on HTGR fuel in the HTR project*, Nuclear Engineering and Design, 233 (1–3) (2004), pp. 163-172
6. R. Giere, P. Stille, *Energy, Waste and the Environment: A Geochemical Perspective*, Geological Society of London, Special Publication 236, 688 pp. ISBN 1-86239167-x, (2004)
7. Masson M, Grandjean S, Lacquement J, Bourg S, Delauzun JM, Lacombe J. , *Block-type HTGR spent fuel processing: CEA investigation program and initial results*. Nucl Eng (Des 2006); 236: 516-525
8. F. Guittonneau, A. Abdelouas, B. Grambow, M. Dialinas, F. Cellier, *New methods for HTR Fuel Waste Management*, in: Proceedings of the 4th International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology, HTR 2008; 28th September–1st October 2008, ASME, (2008).
9. Dokumen Teknis, *Kajian Pengelolaan Limbah Radioaktif Reaktor Daya Eksperimental (RDE) Tipe HTR-10*, No. P.002/BN 04 02/TLR.2, Revisi 1.0, Pusat Teknologi Limbah Radioaktif, (Desember 2015).
10. IrsonJ, “ *Important Viewpoints Proposed for a Safety Approach of HTGR Reactions in Europe*”, International Proceeding ICENES, Belgia, (2005).
11. Wu Z and YuS, “*HTGR Projects in China*”, International Journal on Nuclear Engineering and Technology, vol 39. No 2, (2007), 103-110.
12. ZongxinWu, DengcaiLin, DaxinZhong, “*The Design Features of The HTR-10*”, Nuclear Engineering and Design 218, Elsevier, (2002).
13. Kuat Heriyanto, *Karakteristik Limbah Radioaktif Tingkat Rendah Dan Sedangdari Reaktor Daya Eksperimental Htr-10*, Prosiding Seminar Nasional Teknologi Pengelolaan Limbah XIV , ISSN 1410 – 6086, Pusat Teknologi Limbah Radioaktif – BATAN dan Sekolah Ilmu Lingkungan – UI, Desember (2016).
14. Sofiltra-Poelman, “*Filter and Filter Equipment for Genaral Industry and Nuclear Industry*”, France, (1985).
15. Alan Wareing, Liam Abrahamsen-Mills, Linda Fowler, Michael Grave, Richard Jarvis, Martin Metcalfe, Simon Norris, Anthony William Banford, *Development of integrated waste management options for irradiated graphite*, Nuclear Engineering and Technology, (2017), 1-9.
16. Junfeng Li, Mary Lou Duzsik-Gouga, Jianlong Wang, *Recent advances in the treatment of irradiated graphite: A review*, Annals of Nuclear Energy 110, (2017), 140–147.
17. Johannes Fachinger, Werner von Lensa, Tatjana Podruhzina, *Decontamination of nuclear graphite*, Nuclear Engineering and Design 238, (2008), 3086–3091.
18. Kearsey, H.A., Page, R.J., *Joint BNFL/DOE Intermediate-Level Waste Research Programme: Product Evaluation Task Force, Phase One Report for CAGR Graphite*, Report DOE/RW/84/183. (1984).
19. Fachinger, J., Von Lensa, W., Podruhzina, T., *Decontamination of nuclear graphite*. In: 3rd International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology. North-West University, South Africa, (2006).
20. Fachinger, J., Podruhzina, T., Von Lensa, W., *Decontamination of Nuclear Graphite by Thermal Treatment*,

- Proceedings, Solutions for Graphite Waste*, Manchester, (2007).
21. Podruzina, T., *Graphite as radioactive waste: corrosion behavior under final repository conditions and thermal treatment*, Diss. Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, (2004).
 22. Von Lensa, W., Vulpius, D., Steinmetz, H.J., Girke, N., Bosbach, D., Thomauske, B., Banford, A.W., Bradbury, D., Grambow, B., Grave, M.J., Jones, A.N., Petit, L., Pina, G., *Treatment and disposal of irradiated graphite and other carbonaceous waste*. *Atw. Int. J. Nucl. Power.* 57, (2011), 263–269.
 23. Tian, L., Wen, M., Li, L., Chen, J., *Disintegration of graphite matrix from the simulative high temperature gas-cooled reactor fuel element by electrochemical method*. *Electrochim Acta* 54, (2009), 7313–7317.
 24. Liu, J., Wang, C., Dong, L.M., Liang, T.X., *Study on the recycling of nuclear graphite after micro-oxidation*. *Nucl. Eng. Technol.* 48, (2016), 182–188.
 25. Bradbury, D., Mason, J.B., *Pyrolysis/steam reforming and its potential use in nuclear graphite disposal*. In: *Proceedings, EPRI/EdF International Decommissioning and Radioactive Waste Workshop*, Lyon France, (2004).
 26. Costes, J.R., de Tassigny, C., Vidal, H., *Conditioning of graphite bricks from dismantled gas-cooled reactors for disposal*. *Waste Manage.* 10, (1990), 297–302.

penyimpanan sementara dengan sistem out door, mengalami pendinginan dengan udara konveksi, laju alir udara konveksi dapat dihitung melalui perhitungan transfer panas peluruhan dari dalam kontainer menuju permukaan dinding luar kontainer

Tanya - Jawab

Pertanyaan 1.

Dari : Marhaeni Joko Puspito

Pertanyaan : Bahan bakar HTR sudah melebur berapa % untuk menjadi limbah dan bagaimana untuk mendeteksinya ?

Jawaban : Nilai burn up pebel elemen bakar mencapai 10% baru menjadi limbah, menggunakan sistem komputer/detektor untuk mengatur perintah penggantian pabel elemen bakar.

Pertanyaan 2.

Penanya : Siti Aidah

Pertanyaan : bagaimana proses tempat penyimpanan bahan bakar setelah dari reaktor

Jawaban : BBNB dimasukkan dalam kontainer yang kemudian ditransfer ke lokasi

EVALUASI HASIL ANALISIS EFISIENSI KINERJA SISTEM EVAPORATOR IPLR TAHUN 2014-2017

Ajrieh Setyawan, Nurrandi Mayas Sujati

Pusat Teknologi Limbah Radioaktif-Badan Tenaga Nuklir Nasional

Kawasan PUSPIPTEK Serpong Gedung 50

E-mail: ajrieh@batan.go.id

ABSTRAK

EVALUASI HASIL ANALISIS EFISIENSI KINERJA SISTEM EVAPORATOR IPLR TAHUN 2014-2017. Evaporator merupakan instrumen utama pengolahan limbah radioaktif cair. Mengingat sistem evaporasi telah beroperasi selama lebih dari 30 tahun, maka dilakukan evaluasi hasil analisis efisiensi kinerja evaporasi selama tahun 2014-2017. Efisiensi kalor dihitung dengan data *real input dan output steam* pada sistem pengolahan dan data dukung karakterisasi selama operasi evaporasi. Berdasarkan hasil observasi dan analisa alat evaporator tahun 2014 hingga 2017 didapatkan bahwa sistem evaporasi memiliki efisiensi sebesar 83,10%, 78,36%, 79,38% dan 61,38%. Asumsi yang dapat mempengaruhi efisiensi kalor yaitu *pressure drop* pada pipa, transfer panas ke lingkungan, pembentukan korosi dan kerak, serta berbagai hal yang dapat memengaruhi kualitas *steam*.

Kata Kunci : efisiensi, evaporasi, kalor, limbah radioaktif.

ABSTRACT

EVALUATION OF ANALYSIS OF PERFORMANCE EFFICIENCY OF IPLR EVAPORATOR SYSTEM 2014-2017. Evaporator is the main instrument of processing liquid radioactive waste. Given that the evaporation system has been in operation for more than 30 years, so be needed an evaluation of the efficiency analysis of evaporative performance during 2014-2017. The heat efficiency is calculated by real input and steam output data on the processing system and characterization support during the evaporation operation. Based on the observation and analysis of evaporator equipment from 2014 until 2017, it was found that the evaporation system has efficiency of 83.10%, 78.36%, 79.38% and 61.38%. Assumptions that may affect the efficiency of the heat are pressure drop on pipes, heat transfer to the environment, corrosion and crust formation, and various things that can affect the quality of steam.

Keywords: efficiency, evaporation, heat, radioactive waste.

PENDAHULUAN

Evaporasi dapat didefinisikan sebagai suatu operasi dimana suatu larutan dipisahkan berdasarkan volatilitasnya. Evaporasi dilakukan dengan menguapkan sebagian dari pelarut, sehingga didapatkan larutan zat cair pekat yang konsentrasinya lebih tinggi. Dalam evaporasi, sisa penguapan adalah zat cair yang sangat viskos dan bukan zat padat. Selain itu, evaporasi juga berbeda dengan destilasi, karena uapnya komponen tunggal. Meskipun uap tersebut merupakan campuran, pada proses evaporasi ini hanya berlangsung untuk pemekatan larutan, bukan pembuatan zat padat atau kristal. Selama proses evaporasi, harus diberikan kalor untuk menyediakan energi yang diperlukan untuk mengubah komponen volatil menjadi fase gas [1]

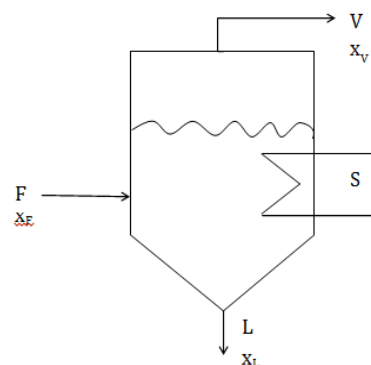
Perpindahan panas dan perpindahan massa adalah dua proses dasar yang terjadi dalam proses penguapan / evaporasi. Konsep perpindahan panas keseluruhan dipakai dalam perlakuan sistem evaporator, dengan persamaan umum seperti yang dinyatakan dalam heat transfer (Perpindahan Panas) : [2]

$$Q = U A \Delta T$$

Dimana Q menyatakan kecepatan perpindahan panas yang melewati bidang pemanas, U adalah

Koefisien perpindahan panas, A adalah luas permukaan perpindahan panas, dan ΔT adalah beda suhu. Tujuan evaluasi hasil analisis kinerja sistem evaporator untuk menghitung nilai efisiensi kinerja evaporator pada pengolahan limbah radioaktif cair dari tahun 2015-2017 dan mengetahui hal-hal yang memengaruhi nilai efisiensi kalor. Analisis ini dilakukan dengan cara membandingkan jumlah *steam* yang dibutuhkan dari hasil perhitungan menggunakan neraca kalor dengan *steam* yang digunakan

Neraca Bahan



Gambar 1: Diagram *single effect evaporator* [3]

Gambar 1 memperlihatkan diagram evaporator yang disederhanakan, dimana bidang pemanas dinyatakan oleh aliran S. Misalkan umpan masuk evaporator dengan kecepatan F kg/jam dan mengandung zat padat dengan fraksi massa x_F . Zat hasil yang meninggalkan evaporator berupa cairan pekat sebanyak L kg/jam dan mengandung solut dengan fraksi berat x_L . Di samping itu dihasilkan pula V kg/jam uap yang mempunyai konsentrasi solut x_V . Persaman neraca bahan total dan neraca bahan solut di evaporator adalah: [3]

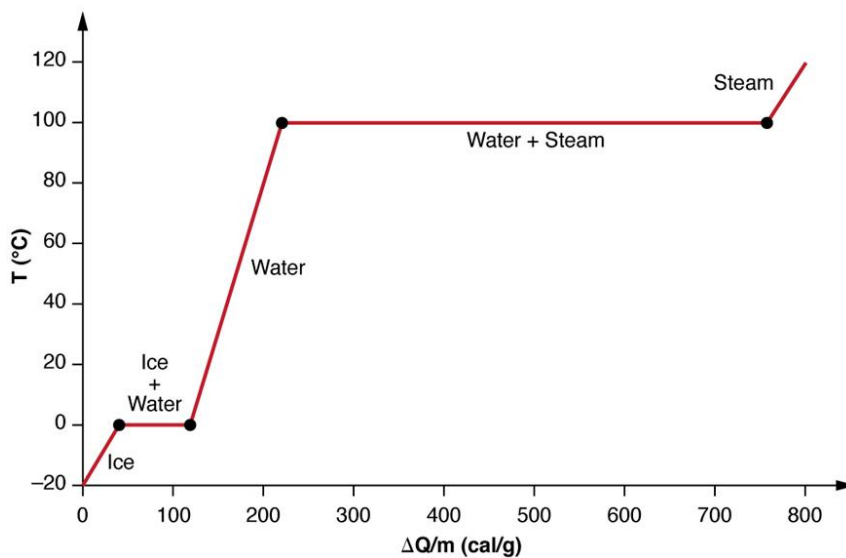
$$F = L + V \dots\dots\dots(1)$$

$$F x_F = L x_L + V x_V \dots\dots\dots(2)$$

Umumnya di dalam uap tidak terdapat solut, sehingga x_V sama dengan nol, sehingga persamaannya menjadi:

$$F x_F = L x_L \dots\dots\dots(3)$$

Kalor Sensibel dan Kalor Laten



Gambar 2 : Grafik suhu vs kalor spesifik [3]

Gambar di atas menunjukkan ada 2 jenis hubungan antara energi kalor yang dimiliki suatu materi dengan temperatur.

$$Q = m c_p \Delta T \dots\dots\dots(4)$$

1. Kenaikan temperatur sebanding dengan energi yang dimiliki
 Sesuai dengan grafik di atas maka terdapat hubungan garis lurus antara $\Delta Q/m$ dengan T. Untuk menghubungkan kedua variabel tersebut maka didefinisikan sebuah koefisien c_p (kapasitas panas spesifik). Kapasitas panas spesifik yaitu jumlah kalor per satuan massa yang dibutuhkan untuk menaikkan temperaturnya sebanyak 1 satuan suhu. Sehingga hubungan antara Q dan T yaitu: [3]

Dimana ΔT merupakan selisih antara suhu suatu materi dengan suhu referensinya.
 Kalor yang dibutuhkan pada saat menaikkan temperatur disebut dengan kalor sensibel.

2. Tidak terjadinya kenaikan temperatur pada saat perubahan fase
 Pada saat perubahan fase, kalor yang diterima suatu materi digunakan untuk mengubah fase materi tersebut, sehingga tidak terjadi peningkatan suhu pada titik tersebut. Oleh karena itu tidak terdapat

hubungan antara Q dan T, melainkan dikenal sebuah variabel yang diberi nama kalor laten spesifik, dengan hubungan sebagai berikut. [3]

$$Q = mL \dots\dots\dots(5)$$

L merupakan besarnya jumlah energi per satuan massa yang dibutuhkan suatu materi untuk berubah fase. Nilainya

bervariasi berdasarkan jenis materi yang diberikan kalor.

METODOLOGI

1. Pengumpulan data

Data mengenai kinerja evaporator dan fasilitas pendukung evaporator diambil dari log book operasi evaporasi tiap tahun. Data – data yang diambil yaitu :

Temperatur (°C)					
Tahun	Steam In	Steam Out	Feed	Vapour	Konsentrat
2014	98	100	25	100	28
2015	98	105	25	105	30
2016	100	105	25	105	30
2017	100	105	25	103	28

Massa (Kg/s)			
Tahun	Steam Aktual	Feed	Konsentrat
2014	0,361	0,27	0,004
2015	0,27	0,214	4,41.10 ⁻⁴
2016	0,354	0,208	0,002
2017	0,347	0,45	0,03

Asumsi

- a) Suhu limbah masuk sama dengan suhu ruangan (25°C)
- b) Suhu steam keluar sama dengan suhu vapour
- c) Cp limbah sama dengan Cp konsentrat
- d) Tidak ada kenaikan titik didih pada limbah, konsentrat, dan steam
- e) Nilai konsentrasi massa pelarut (air) sama dengan densitasnya

(An Engineering Approach, 5th edition, Cengel M Yunus and Michael A. boles).

Berikut tahapan-tahapan menghitung efisiensi dari evaporator

Menghitung Q Total : Q sensible + Q latent

Menghitung Efisiensi : (Uap yg dihasilkan ÷ Uap aktual)*100%

2. Study Literature

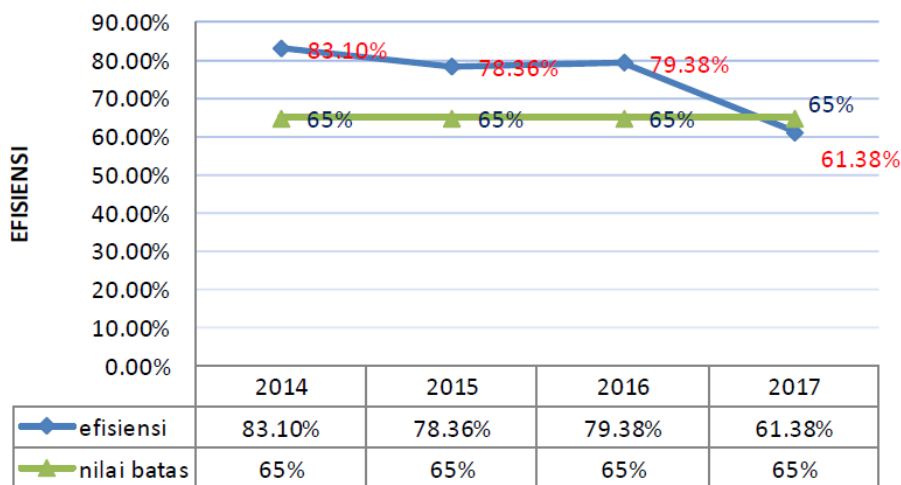
Metode *study literature* ini dilakukan dengan membaca literatur-literatur yang berkaitan dengan Efisiensi Kinerja Evaporator pada Pengolahan Limbah Radioaktif Cair. serta mengutip referensi tertulis seputar hal yang dibutuhkan. Beberapa referensi berupa artikel, jurnal ilmiah, proposal serta buku-buku penunjang lainnya yang berkaitan dengan perhitungan.

Dalam menghitung efisiensi evaporator yang perlu diperhatikan adalah mencari nilai specific entalpi yang didapat diperoleh dari tabel steam

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis efisiensi kalor dilaksanakan dengan tujuan untuk mengetahui efisiensi penggunaan energi kalor dalam pengolahan limbah radioaktif secara evaporasi di PTLR selama tahun 2014 – 2017. Hasil analisa efisiensi dapat dilihat pada tabel 1.

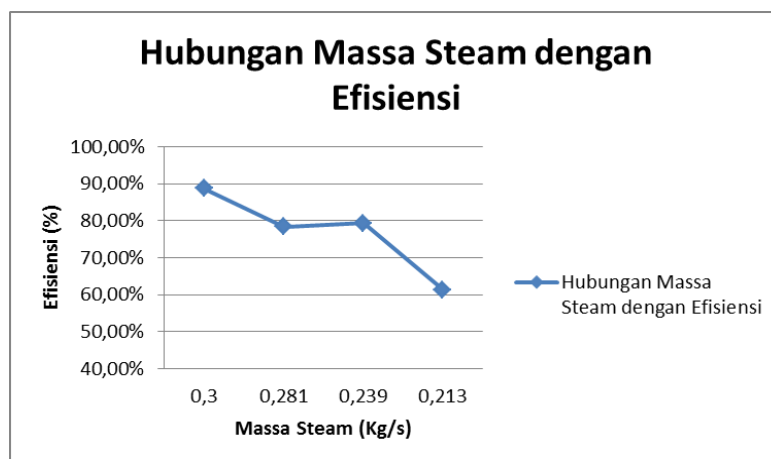
Tabel 1. Analisa Performa Efisiensi Evaporasi tahun 2014 – 2017.



Dari tabel 1. hasil analisis 2014 hingga 2017 didapatkan bahwa sistem evaporasi memiliki efisiensi kalor sebesar 83,10%, 78,36%,79,38% dan 61,38% . Angka tersebut didapat melalui perbandingan jumlah steam yang digunakan pada sistem evaporasi di PTLR dengan jumlah steam yang digunakan pada sistem ideal. Nilai efisiensi kalor terjadi penurunan pada tahun 2015 yang sebelumnya 83,10% menjadi 78,36%. Namun, pada tahun 2016 terjadi sedikit peningkatan efisiensi kalor

menjadi 79,38%. Terjadinya kenaikan nilai efisiensi kalor dikarenakan terjadinya perbaikan alat ukur dan pembersihan kerak pada plat perpindahan panas didalam evaporator pada tahun 2016. Pada tahun 2017 terjadi penurunan nilai efisiensi kalor yang cukup signifikan yang sebelumnya 79,38% menjadi 61,38% hal ini dapat disebabkan karena pada periode operasi 2016 dan 2017 belum dilakukannya perendaman menggunakan asam nitrat untuk menghilangkan potensi sumbatan gumpalan keras dan kerak dalam sistem evaporator.

Tabel 2. Hubungan massa steam dengan nilai efisiensi tahun 2014 – 2017.



Parameter lain penyebab tidak sempurnanya nilai efisiensi kalor disebabkan oleh beberapa hal, salah satunya oleh *pressure drop*. *Pressure drop* disebabkan karena adanya gaya gesek yang terjadi dengan pipa. Gaya gesek tersebut dapat meningkatkan tahanan pada transfer massa dari boiler menuju evaporator, sehingga properti

steam yang dihasilkan pada boiler tidak sama dengan steam yang digunakan di evaporator. Selain *pressure drop*, efisiensi juga sangat dipengaruhi oleh transfer panas keluar sistem. Pada praktiknya, kalor yang dibawa oleh steam tidak sepenuhnya digunakan untuk memisahkan konsentrat dan destilat, melainkan juga didapat

kalor yang lepas pada pipa dari *boiler* menuju evaporator, dan bahkan perpindahan panas keluar sistem juga terjadi pada evaporator. *Pressure drop* dan pelepasan kalor kelingkuangan tidak dapat dicegah, melainkan hanya dapat dikurangi dampaknya pada sistem evaporasi.

Selain *pressure drop* dan transfer panas keluar sistem, penurunan efisiensi kalor juga dapat disebabkan karena reaksi antara limbah radioaktif cair dengan peralatan yang digunakan (korosi, kerak). Korosi dan kerak pada permukaan penghantar panas dapat menghambat proses perpindahan panas pada evaporator sehingga dibutuhkan *steam* yang lebih banyak agar evaporasi berjalan normal. Selain itu, penurunan efisiensi kalor dapat disebabkan karena terdapat pipa yang bocor, kesalahan alat ukur, dan sebagainya.

KESIMPULAN

Dari hasil analisis 2014 hingga 2017 didapatkan bahwa sistem evaporasi memiliki efisiensi kalor sebesar 83,10%, 78,36%, 79,38% dan 61,38% . Angka tersebut didapat melalui perbandingan jumlah *steam* yang digunakan pada sistem evaporasi di PTLR dengan jumlah *steam* yang digunakan pada sistem ideal.

Hal-hal yang mempengaruhi efisiensi yaitu *pressure drop* pada pipa, transfer panas ke lingkungan, pembentukan korosi dan kerak, serta berbagai hal yang dapat memengaruhi kualitas *steam*.

DAFTAR PUSTAKA

1. Walman, Edo. Diklat Operasi Teknik Kimia Pengolahan Limbah Radioaktif. Serpong: BATAN, (1994).
2. Benedict, M., Pigford, T. H., & Levi, H. W. *Nuclear Chemical Engineering*. New York: McGraw-Hill,
3. *Evaporation System, System Note RWI 220 NJM 0001*. (1981).
4. Johan, Bahdir. Buletin Limbah. Serpong: P2PLR-BATAN, (2000).
5. Nicholas. *Handbook of Chemical Equipment*. Boston: Butterworth-Heinemann, (2000).
6. Brown. 1978. Unit Operation. New York: J.Wiley and Sons

Tanya Jawab

Penanya : Sri Wahyuningsih

Pertanyaan :

1. Apa yang dilakukan untuk meningkatkan efisiensi kinerja sistem evaporator IPLR.

Jawaban :

1. Yang dilakukan untuk meningkatkan efisiensi kinerja :
 - a. meminimalisir *pressure drop* dan transfer panas yang keluar sistem yaitu dengan menghilangkan/mengurangi sambutan dalam pemipaan, perbaikan sistem pemipaan .
 - b. meminimalisir kerak/ korosi : kerak dan korosi akan menghambat proses perpindahan panas pada evaporasi. Salah satu solusinya dengan melakukan perendaman asam pada saat selesai evaporasi setelah konsentrat dijadikan limbah untuk imobilisasi.

PENGARUH PEMINDAHAN TARGET TERIRRADIASI DARI REAKTOR KE PT.INUKI TERHADAP KUALITAS AIR KANAL KH-IPSB3

Arifin, Titik Sundari, Darmawan Aji
Pusat Teknologi Limbah Radioaktif-BATAN
Kawasan PUSPIPTEK Serpong Gedung No.50
E-mail: arifin@batan.go.id

ABSTRAK

PENGARUH PEMINDAHAN TARGET TERIRRADIASI DARI REAKTOR KE PT.INUKI TERHADAP KUALITAS AIR KANAL KH-IPSB3, Fasilitas Kanal Hubung Instalasi Penyimpanan Sementara Bahan Bakar Bekas (KH-IPSB3) digunakan untuk menyimpan sementara bahan bakar nuklir bekas di dalam suatu kolam yang berisi air pendingin. Di samping itu instalasi kanal hubung penyimpanan sementara bahan bakar bekas juga mempunyai kanal hubung yang berfungsi untuk kegiatan pemindahan sampel material terirradiasi yaitu pemindahan material dari reaktor ke instalasi PT.INUKI. Dalam pemindahan sampel target terirradiasi perlu adanya pengawasan Petugas Proteksi radiasi untuk menjaga agar material terirradiasi yang di bawa atau dipindahkan dari reaktor ke PT.INUKI berjalan dengan selamat. Analisis air kanal setelah dilewati target terirradiasi perlu dilakukan untuk mengetahui pengaruh pemindahan target terhadap kualitas air kanal. Jenis target iradiasi yang dipindahkan melalui kanal hubung terdiri dari 2 jenis yaitu *Fission Product Molybdenum(FPM)* dan *Telurium Oksida (TeO₂)*. Dari hasil penelitian dapat diketahui adanya kontaminasi radionuklida hasil belah uranium yaitu Cs-137, I-133, Sb-124 dan Ce-143. Dari kedua jenis target yang melewati kanal hubung, FPM lebih mempunyai potensi kontaminasi air kanal dibandingkan dengan target TeO₂. Berdasar hasil analisis air kanal setelah dilewati target TeO₂ juga menunjukkan adanya kontaminasi radionuklida hasil belah yaitu I-133, Sb-124, dan Ce-143. Hal ini dimungkinkan karena pada saat transfer target iradiasi, tidak hanya terjadi transfer target tetapi juga ada transfer/pergerakan air pendingin reaktor ke arah kanal hubung sehingga hasil belah uranium dapat terikut pada saat transfer target yang tidak menimbulkan hasil belah uranium.

Kata Kunci Target terirradiasi, KH-IPSB3, Kualitas Air KH-IPSB3.

ABSTRACT

INFLUENCE OF TRANSFER OF IRRADIATED TARGET FROM REACTOR TO PT.INUKI ON WATER QUALITY CHANNEL OF TC-ISFSF. Interim Storage for Spent Nuclear fuel (TC-ISFSF) is used to temporarily store spent nuclear fuel in a pond containing cooling water. In addition, the installation of temporary storage intermediate storage channels also has channel connections that function for irradiation material transfer activity ie transfer of material from reactor to radioisotope and radiofarmaka (PRR) installation for PT.INUKI. In the transfer of the target sample irradiated it is necessary to supervise the Radiation Officer to keep the irradiated materials carried or removed from the reactor to PT.INUKI safely. Analysis of the channel water after the irradiated target is to be carried out to determine the effect of target movement on the water quality of the canal. Types of Telurium Oksida (TeO₂) irradiated targets transferred through the connecting channel consist of 2 types: Fission Product Molybdenum(FPM) and TeO₂. From the research results can be seen that the contamination of uranium-derived radionuclides are Cs-137, I-133, Sb-124 and Ce-143. Of the two target types passing through the connecting channel, FPM has more potential for channel water contamination than the TeO₂ target. Based on the results of the water analysis of the canal after passing the target TeO₂ also shows the contamination of radionuclide that is I-133, Sb-124, and Ce-143. This is possible because at the time of transfer target irradiation, not only transfer target but also there is transfer / movement of reactor cooling water into channel direction so that the result of uranium can be included at the time of transfer of target that does not generate uranium split.

Keywords: Irradiation Target, Channel Of TC-ISFSF, Water quality Channel Of TC-ISFSF

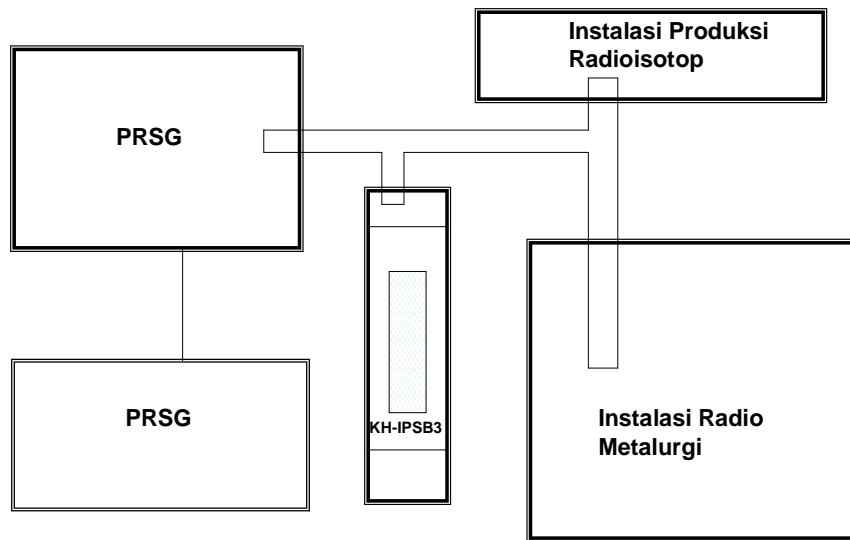
PENDAHULUAN

Kanal Hubung Instalasi Penyimpanan Bahan Bakar Bekas (KH_IPSB3) yang ada di Pusat Penelitian Tenaga Nuklir (PPTN) Serpong dibangun pada tahun 1993 dan dirancang oleh Atomic Energy Agency Technology, United Kingdom (UK-AEA). Kanal hubung ini menghubungkan IPSB3 dengan tiga instalasi, yaitu Instalasi Radio Metalurgi (IRM), Instalasi Produksi Radioisotop dan Radiasi farmaka

(IPRR)/PT INUKI dan Pusat Reaktor Serba Guna (PRSG), kanal ini berfungsi sebagai jalur untuk memindahkan elemen bakar bekas dari PRSG dan bahan terirradiasi yang berasal dari IPR/PT INUKI dan IRM dengan denah lokasi seperti yang ditunjukkan Gambar 1 Target yang sudah diirradiasi di teras reaktor seperti U₂₃₅, TeO₂, Sm₂O₃ dan FPM melewati hotcell dan melalui kanal hubung ditransfer menuju PT INUKI untuk diproses lebih lanjut. Sistem penanganan bahan bakar bekas maupun material terirradiasi terdiri

dari sebuah rel tunggal yang melayani tiga *Mass transfer unit (MTU)*. Setiap MTU mempunyai kemampuan untuk membawa dan memindahkan bahan bakar/bahan radioaktif dari gedung

reaktor, Instalasi Radio Isotop, Instalasi Radio Metalurgi ke bagian utama Kanal Hubung [1,2,3].



Gambar 1. denah lokasi KH-IPSB3

Pada fasilitas KH-IPSB3 perlu diperhatikan hal-hal yang berkaitan dengan keselamatan bagi pekerja radiasi maupun lingkungan, seperti pencegahan terjadinya kecelakaan karena kritikalitas, pencegahan adanya paparan radiasi yang melebihi batas ($5 \mu\text{Sv/jam}$) dan jatuhnya assembly selama penanganan.

Untuk menghindari paparan radiasi langsung, penanganan bahan bakar bekas dan bahan teriradiasi lain dilaksanakan di bawah permukaan air. Ketebalan lapisan air di atas bahan bakar bekas dan bahan teriradiasi lain dipertahankan sesuai dengan persyaratan keselamatan.

Potensi pelepasan zat radioaktif dibatasi dengan cara sebagai berikut [1] :

- Bahan bakar bekas yang disimpan di KH-IPSB3 didinginkan/diluruhkan dahulu di kolam bahan bakar bekas yang ada di kolam reaktor sekurang-kurangnya selama 100 hari. Hal ini dimaksudkan untuk mengurangi kandungan panas dan peluruhan, Iodine-131 yang ada di dalam bahan bakar akan habis meluruh.
- Bahan bakar terkontaminasi dengan tingkat yang tinggi (*heavily contaminated items*) tidak diijinkan disimpan di IPSB3. Bahan bakar percobaan dan bahan bakar reaktor yang cacat harus di tempatkan di dalam wadah atau didekontaminasikan terlebih dahulu sebelum disimpan di KH-IPSB3, Pewadahan dan dekontaminasi menjadi

tanggung jawab pemilik bahan-bahan terirradiasi tersebut.

- IPSB3 hanya digunakan untuk penyimpanan bahan radioaktif, tidak untuk suatu kegiatan yang dapat menimbulkan kontaminasi.

Pertimbangan keselamatan di atas sudah diintegrasikan di dalam desain, khususnya adalah potensi pelepasan materi radioaktif lebih rendah dari ketiga instalasi yang sudah berdiri (RSG-GAS, IPR/PT INUKI dan IRM).

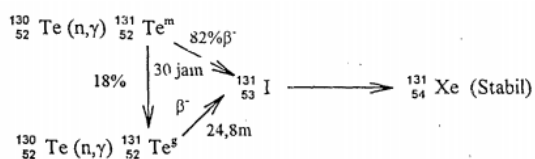
Syarat-syarat perisai radiasi dipenuhi selain oleh ketinggian air di dalam kanal hubung juga oleh ketebalan dinding beton yang memanjang sesuai dengan panjang saluran kanal hubung. Pada operasi normal perisai ini akan menghasilkan dosis radiasi $< 5 \mu\text{Sv/jam}$. Jalan masuk ke lorong sepanjang kanal hubung adalah melalui KH-IPSB3 dan PRR Lorong ini memberikan kemudahan untuk mengecek dan mengendalikan operasi KH terutama apabila ada masalah dan tidak digunakan sebagai jalan masuk ke instalasi RSG-GAS, IRM dan PRR. Jalan keluar darurat disediakan melalui *hotchell* yang terletak di lorong RSG-GAS dan lorong IRM.

Perawatan terhadap keutuhan kanal hubung dalam kaitannya untuk mempertahankan perisai radiasi selama pemindahan bahan bakar bekas nuklir berlangsung, dipenuhi oleh ketinggian air sepanjang kanal. Sambungan seismik yang fleksibel dipasang di instalasi

dengan tujuan untuk mengantisipasi pergeseran letak pondasi apabila terjadi peristiwa seismik.

Alat utama yang digunakan dalam proses transfer material teriradiasi dari PRSG menuju PT INUKI melalui kanal hubung adalah *Mass Transfer Unit* (MTU). Pelaksanaan kegiatan pengoperasian peralatan MTU untuk pemindahan target teriradiasi dari reaktor ke PT INUKI memenuhi standar keselamatan kerja alat dan personil. Kegiatan pengoperasian peralatan MTU Unit untuk pemindahan target teriradiasi dari reaktor ke PT INUKI di Kanal hubung Instalasi Penyimpanan Bahan Bakar Bekas sangat mendukung dalam pemanfaatan fasilitas nuklir sehingga alat dapat lebih berdayaguna dan berhasil guna. Target teriradiasi seperti U_{235} , TeO_2 , Sm_2O_3 dan FPM dapat ditransfer dari teras reaktor ke PRR untuk proses lebih lanjut dengan selamat dan tidak mengalami kegagalan [1].

Laporan Analisis Keselamatan iradiasi sampel TeO_2 Massa TeO_2 yang diiradiasi 100 gram, target diiradiasi selama 7 x 24 jam, suhu target pada bagian tengah 156,30C dan bagian dinding luar kapsul 51,10C, reaktivitas yang ditimbulkan -0,0066% . Laporan Analisis Keselamatan iradiasi sampel FPM-LEU (U_{235}) Iradiasi target yang mempunyai kadar pengkayaan rendah 19,75% dan berat total Uranium 5 gram dapat dilaksanakan, tetapi yang diijinkan untuk diiradiasi seberat 3 gram. Dalam stringer dapat ditempatkan dua buah kapsul. Reaktivitas teras menjadi lebih besar 0,2% dari keadaan awal 9,2% menjadi 9,4% dan secara neutronik kenaikan ini diijinkan oleh SAR. Reaksi yang terjadi dari iradiasi target TeO_2 ditunjukkan sebagai berikut [4,5]:



Kegiatan iradiasi Target FPM-LEU dalam rangka produksi radioisotop ^{99}Mo hasil fisi U_{235} telah dilakukan secara rutin di RSG-GAS. Iradiasi target FPM-LEU akan memberikan reaktivitas positif. Untuk kondisi FPM yang mengalami kebocoran hal ini akan memberikan reaktivitas positif yang lebih besar dibandingkan dengan kondisi normal. Sehingga perlu dilakukan analisis neutronik untuk menjamin bahwa penambahan reaktivitas positif tersebut masih berada dalam batas yang telah ditentukan. Target Iradiasi FPM-LEU Elektroplating adalah kapsul FPM yang dibuat dengan cara menempelkan uranium pada tabung *stainless steel* (SS) dengan metode elektrokimia. Spesifikasi FPM-LEU adalah sebagai berikut:

FPM-LEU mengandung Uranium Metal yang diperkaya 20%, diameter dalam dan luar kapsul adalah 2,7 cm dan 2,9 cm dan tinggi maksimum plating adalah 40 cm [6].

Ruang lingkup ini meliputi analisis jenis dan konsentrasi radionuklida dalam sampel air kanal KH-IPSB3 setelah dilewati material teriradiasi dari PRSG ke PT INUKI. Ini bertujuan untuk mengetahui jenis dan konsentrasi radionuklida yang terkandung dalam air kanal KH-IPSB3 akibat pemindahan material teriradiasi sehingga dapat menjadi data base kualitas air kanal KH-IPSB3.

METODOLOGI

Bahan

1. Target (FPM-LEU terirradiasi.)
2. TeO_2 (terirradiasi)

Alat :

1. Mass transfer Unit
2. Trolley
3. Handling tool
4. Lampu sorot.
5. Botol sampling
6. Alat MCA

Metode

1. Letakkan target pada basket yang ada di trolley MTU, kemudian operasikan MTU dengan menekan tombol "On"
2. Setelah sampai pada kanal PT. Inuki lalu pindahkan target ke trolley PT. Inuki
3. Koordinasi dengan operator PT Inuki untuk di bawa ke kolam transit yang selanjutnya untuk di simpan di hotshell Inuki.
4. Penerimaan dan pemindahan target/material teriradiasi dari PRSG ke PT INUKI harus dilengkapi form pemindahan target
5. Pengambilan sampel air kanal setelah kegiatan pemindahan material teriradiasi dengan cara mengoperasikan sistem purifikasi pada mode 5 dengan menggunakan botol sampel.
6. Analisis sampel air kanal untuk mengetahui kandungan radionuklidanya menggunakan alat spektrometer gamma *Multy Channel Analyzer* (MCA) tipe ORTEC.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kegiatan pemindahan material teriradiasi melalui kanal hubung fasilitas KH-IPSB3 ini dilakukan sejak tanggal 28 September 2016 sampai dengan 7 Juni 2017. Selama periode ini, jenis material teriradiasi yang ditransfer

terdiri dari TeO_2 dan FPM. Pada setiap kegiatan pemindahan, operator kanal hubung selalu didampingi oleh PPR sehingga laju dosis pada saat kegiatan berlangsung dapat dipantau dan dikendalikan. Kegiatan transfer material teriradiasi dilakukan di dalam air kanal sepanjang perjalanan dari kanal arah reaktor menuju kanal arah PT INUKI. Air dalam kanal berfungsi sebagai perisai radiasi bagi pekerja radiasi sehingga dosis radiasi yang diterima oleh pekerja radiasi yang bertugas memindahkan target teriradiasi tidak melebihi nilai batas dosis yang

ditetapkan. Kegiatan pengambilan sampel air kanal dilakukan setelah target teriradiasi dipindahkan melewati air kanal yang bertujuan untuk mendapatkan data dan kondisi anomali yang mungkin terjadi. Sampel air kanal yang diambil adalah sebanyak 500 ml untuk dilakukan analisis menggunakan *Multy Channel Analysis (MCA)* untuk mengetahui kadar radioaktivitasnya. Data hasil analisis radioaktivitas air kanal setelah pemindahan material teriradiasi ditunjukkan pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Data Hasil Analisis Radioaktivitas Air Kanal Setelah Pemindahan Material Teriradiasi

No.	Tanggal	Bahan Teriradiasi	Jumlah Lintas	Laju Dosis Transfer ($\mu\text{Sv}/\text{jam}$)	Radioaktivitas air Kanal ($\mu\text{Ci}/\text{ml}$)
1.	28 September 2016	TeO_2	1	0,2	TTD (Tidak Terdeteksi)
2.	21 Oktober 2016	TeO_2	1	0,22	I-133: $5,32 \times 10^{-5}$ Sb-124: $4,62 \times 10^{-5}$
3.	12 Januari 2017	TeO_2	1	0,2	Ce-143: $1,6 \times 10^{-6}$ I-133: $4,6 \times 10^{-4}$
4.	25 Januari 2017	TeO_2	1	0,3	Sb-124: $5,1 \times 10^{-5}$
5.	1 Februari 2017	FPM FPM TeO_2	1	0,22	Ce-143: $5,04 \times 10^{-5}$
6.	8 Februari 2017	FPM	1	4,68	Ce-143: $5,00 \times 10^{-5}$
7.	15 Februari 2017	FPM	1	0,44	TTD
8.	1 Maret 2017	FPM FPM TeO_2	1	0,82	TTD(Tidak Terdeteksi)
9.	8 Maret 2017	FPM	1	0,2	TTD(Tidak Terdeteksi)
10.	15 Maret 2017	FPM FPM TeO_2	1	3,57	TTD(Tidak Terdeteksi)
11.	29 Maret 2017	TeO_2 FPM FPM	1	3,18	TTD(Tidak Terdeteksi)
12.	25 April 2017	FPM TeO_2	1	41,2	Ce-143: $5,2 \times 10^{-6}$
13.	24 Mei 2017	FPM	1	0,16	Cs-137: $2,0 \times 10^{-7}$
14.	31 Mei 2017	FPM TeO_2	1	0,22	TTD(Tidak Terdeteksi)
15.	7 Juni 2017	TeO_2 FPM	1	0,24	TTD(Tidak Terdeteksi)

Tabel 1 menunjukkan bahwa besarnya laju dosis proses pemindahan target teriradiasi berfluktuasi tidak berbanding lurus terhadap hasil analisis kadar radionuklida dalam air kanal. Laju dosis selama proses transfer dipengaruhi oleh letak kedalaman target iradiasi saat dibawa/ditransfer di dalam air kanal. Semakin dalam air yang menjadi perisai radiasi, maka semakin kecil laju dosisnya.

Dari Tabel 1 dapat diketahui bahwa radionuklida yang muncul dalam air kanal adalah Cs-137,

I-133, Sb-124, dan Ce-143. Keempat jenis radionuklida tersebut merupakan radionuklida hasil fisi/reaksi pembelahan inti di reaktor nuklir akibat iradiasi material/bahan nuklir. Radionuklida Cs-137 merupakan produk fisi yang penting untuk dipantau karena memiliki umur paro yang panjang (30,17 tahun). Pada

Tabel 1 menunjukkan bahwa Cs-137 hanya terdeteksi sekali yaitu dengan konsentrasi $2,0 \times 10^{-7}$ $\mu\text{Ci/ml}$. Radionuklida Cs-137 merupakan pemancar gamma kuat sehingga sangat mudah untuk dianalisa menggunakan Spektrometri Gamma. Kelarutan Cs-137 dalam air tinggi, sehingga Cs-137 dengan mudah ditransfer ke dalam siklus sistem pendingin air di kanal hubung saat target teriradiasi melewati kanal hubung. Dalam sistem purifikasi air kanal juga tersedia kolom Cesium filter yang mempunyai fungsi utama untuk menangkap unsur Cesium dalam air kanal yang disirkulasikan. Radionuklida Cs-137 merupakan radionuklida yang dapat keluar dari kelongsong secara difusi dan masuk ke sistem air pendingin.

Radionuklida I-133 merupakan radionuklida hasil belah yang memiliki umur paro pendek yaitu 20 jam. Radionuklida ini mempunyai yield cukup tinggi dalam reaksi fisi di reaktor nuklir dan dapat juga mendifusi dengan mudah ditransfer ke dalam siklus sistem pendingin air di kanal hubung saat target teriradiasi melewati kanal hubung. Pada Tabel 1 dapat diketahui bahwa radionuklida I-133 terdeteksi 2 kali dengan konsentrasi paling tinggi dibanding radionuklida lain yaitu $4,6 \times 10^{-4}$ $\mu\text{Ci/ml}$.

Radionuklida Sb-124 dan Ce-143 juga merupakan radionuklida produk fisi yang mempunyai umur paro pendek yaitu masing-masing memiliki umur paro 60 hari dan 1,4 hari. Radionuklida Sb-124 terdeteksi 2 kali dengan konsentrasi tertinggi radionuklida Sb-124 pada saat kegiatan transfer target teriradiasi adalah $5,1 \times 10^{-5}$ $\mu\text{Ci/ml}$. Radionuklida Ce-143 terdeteksi 4 kali dengan konsentrasi tertinggi $5,04 \times 10^{-5}$ $\mu\text{Ci/ml}$.

Jenis target teriradiasi yang melewati kanal hubung terdiri dari 2 jenis yaitu FPM dan TeO₂. TeO₂ di iradiasi di reaktor untuk memproduksi unsur radioaktif I-131. Radionuklida I-131 dapat berada di air kanal karena sifatnya volatile sehingga dapat keluar dari bahan teriradiasi yang seanjutnya terkungkung dalam air kanal. Sedangkan target FPM merupakan *Low Enriched Uranium* (Uranium pengkayaan rendah) yang dilakukan iradiasi di reaktor dengan tujuan untuk menghasilkan Mo-99 dari hasil fisi U₂₃₅. Sehingga pada target FPM mempunyai potensi adanya radionuklida hasil belah uranium. Dari kedua jenis target yang melewati kanal hubung, FPM lebih mempunyai potensi kontaminasi air kanal dibandingkan dengan target TeO₂. Akan tetapi berdasar hasil analisis air kanal setelah dilewati target TeO₂ saja seperti ditunjukkan pada No.2 sampai dengan No.4 juga menunjukkan adanya kontaminasi radionuklida

hasil belah yaitu I-133, Sb-124, dan Ce-143. Hal ini dimungkinkan karena pada saat transfer target iradiasi, tidak hanya terjadi transfer target tetapi juga ada transfer/pergerakan air pendingin reaktor ke arah kanal hubung sehingga hasil belah uranium dapat terikut pada saat transfer target yang tidak menimbulkan hasil belah uranium.

Radionuklida kontaminan yang berada di dalam air kanal dapat menyebabkan potensi kontaminasi terhadap pekerja radiasi. Sehingga harus dilakukan operasi system purifikasi agar kualitas air kanal sesuai dengan batas kondisi operasi yang dipersyaratkan yaitu $1,891 \times 10^{-5}$ $\mu\text{Ci/ml}$.

KESIMPULAN

Dari kedua jenis target yang melewati kanal hubung, FPM lebih mempunyai potensi kontaminasi air kanal dibandingkan dengan target TeO₂. Berdasar hasil analisis air kanal setelah dilewati target TeO₂ juga menunjukkan adanya kontaminasi radionuklida hasil belah yaitu I-133, Sb-124, dan Ce-143. Hal ini dimungkinkan karena pada saat transfer target iradiasi, tidak hanya terjadi transfer target tetapi juga ada transfer/pergerakan air pendingin reaktor ke arah kanal hubung sehingga hasil belah dapat terikut pada saat transfer target yang tidak menimbulkan hasil belah.

DAFTAR PUSTAKA

1. Sudiyono, "Pengoperasian Kanal Hubung-Instalasi Penyimpanan Sementara Bahan Bakar Bekas (KH-IPSB3)", Diktat Pelatihan Operator dan Supervisor KH-IPSB3, 2012.
2. Laporan Analisis Keselamatan Kanal Hubung Instalasi Penyimpanan Sementara Bahan Bakar Bekas (LAK KH-IPSB3), rev 7, PTLR – BATAN. 2009.
3. Dyah S Rahayu, *Report of Repatriation for Spent Nuclear Fuel arising from MPR-GAS*, BATAN, Serpong, Tangerang Selatan Banten, Indonesia. 2010.
4. Suwoto, dkk. Optimasi Iradiasi Sulfur dan Tellurium di RSG-GAS. Prosiding Seminar Hasil Penelitian PRSG Tahun 1997-1998.
5. Duyeh Setiawan, dkk., Pengembangan Teknologi Proses Radioisotop Medis I-131 Menggunakan Metode Kolom Resni Penukar Ion untuk Aplikasi Kedokteran

- Nuklir. Jurnal Sains dan Teknologi Nuklir Indonesia. Vol 18, No.1 Februari 2017.
6. Daddy Setyawan. Verifikasi Pengaruh Kebocoran fpm Terhadap Keselamatan Operasi Reaktor RSG-GAS. Prosiding Seminar Keselamatan Nuklir. 2014

STUDI AWAL AUDIT ENERGI PADA GEDUNG PUSAT SAINS TEKNOLOGI BAHAN MAJU – BADAN TENAGA NUKLIR NASIONAL

Suyatno, Yana MK, Sairun

Pusat Sains dan Teknologi Bahan Maju – BATAN

Suyatno4787@batan.go.id

ABSTRAK

STUDI AWAL AUDIT ENERGI PADA GEDUNG PUSAT SAINS TEKNOLOGI BAHAN MAJU – BADAN TENAGA NUKLIR NASIONAL. Telah dilakukan audit energi awal dalam rangka program penghematan energi pada PSTBM – BATAN, dari hasil audit energi awal konsumsi energi listrik satu bulan adalah senilai 41.871,27 kWh. Dengan target nilai Intensitas Konsumsi Energi Gedung PSTBM didapat sebesar 13,56 KWh/m², hasil capaian target IKE tersebut masuk dalam kategori efisien (8.5 – 14 KWh/m²) berdasarkan Peraturan Menteri ESDM No. 13 tahun 2012, dan cukup efisien (12.08 s/d 14.58 KWh/m²) berdasarkan Standar Kriteria IKE bangunan gedung berdasarkan Departemen Pendidikan Nasional Tahun 2004. Audit energi awal dilaksanakan pada bulan Februari 2017 dengan mengumpulkan terlebih dahulu data historis kemudian melakukan audit energi langsung pada seluruh gedung di PSTBM. Setelah selesai maka data yang didapat dianalisa dan kemudian diperoleh kesimpulan bahwa gedung 40 mengonsumsi energi listrik paling banyak sebesar 29.990,78 kWh/bulan atau sekitar 73 %, dan gedung 41 mengonsumsi energi paling sedikit sebesar 586,85 kWh/bulan atau sekitar 1 %. Kosumsi listrik dari pendingin ruangan adalah paling banyak senilai 74% dari seluruh sektor, maka perlu dilakukan modifikasi pendingin ruangan dengan Teknologi AC yang terbaru menggunakan gas freon jenis R410. Rekomendasi dari program audit energi awal ini adalah dengan melaksanakan audit energi terinci yang akan menghasilkan rekomendasi penghematan energi listrik.

Kata Kunci : Audit energi, Penghematan Energi, Intensitas Konsumsi Energi (IKE).

ABSTRACT

EARLY STUDY OF ENERGY AUDIT ON THE BUILDING OF SAINS CENTER TECHNOLOGY MATERIALS - NATIONAL NUCLEAR AGENCY. Initial energy audit has been conducted in the framework of energy saving program in PSTBM - BATAN, from the result of initial energy audit of electric energy consumption one month is worth 41.871,27 kWh. With the target of Energy Consumption Intensity of PSTBM Building obtained at 13.56 KWh / m², the achievement target of IKE is categorized as efficient (8.5 - 14 KWh / m²) pursuant to Regulation of Minister of Energy and Mineral Resources. 13 in 2012, and quite efficient (12.08 s / d 14.58 KWh / m²) based on IKE Criteria Standard building based on the Ministry of National Education Year 2004. The initial energy audit was conducted in February 2017 by collecting historical data and then conducting a direct energy audit on all buildings in PSTBM. After completion, the data obtained were analyzed and then it was concluded that 40 buildings consumed most electricity at 29,990.78 kWh / month or about 73%, and 41 buildings consumed at least 586.85 kWh / month or about 1%. Electrical cooling from air conditioners is 74% of most sectors in total, it is necessary to modify the cooling ruangan with the latest AC technology using R410 type freon gas. The recommendation of this initial energy audit program is to carry out a detailed energy audit that will produce energy saving recommendations electricity.

Keywords: *Energy audit, Energy Saving, Energi Consumption Intensity (IKE).*

PENDAHULUAN

Kemajuan teknologi di segala bidang meningkat dengan begitu cepat, kemajuan ini membawa konsekuensi peningkatan kebutuhan akan daya listrik. Dalam sistem kelistrikan estimasi sangat dibutuhkan untuk memperkirakan dengan tepat seberapa besar daya listrik yang dibutuhkan untuk melayani beban dan kebutuhan energi listrik dimasa yang akan datang. Selain faktor teknis, faktor ekonomi juga merupakan faktor terpenting yang perlu diperhitungkan. Kegiatan audit energi merupakan *top down initiative*, yang keberhasilannya sangat bergantung kepada *resources* yang dialokasikan. Dalam banyak

cara, audit energi sama halnya dengan laporan keuangan dan pemeriksaan. Audit energi ini merupakan dokumentasi spesifik atas berbagai bentuk energi yang digunakan selama rentang waktu tertentu – biasanya untuk satu tahun.

Untuk itu pemerintah telah mengeluarkan Instruksi Presiden Nomor 13 Tahun 2011 tentang penghematan energi dan air kepada seluruh aparaturnegara untuk melakukan langkah – langkah dan inovasi penghematan energi dan air di lingkungannya masing – masing (milik Negara ataupun daerah). Dengan berlandaskan instruksi tersebut, pemerintah menetapkan Pedoman Teknis Audit Energi dalam Implementasi Konservasi Energi dan

Pengurangan Emisi CO di Sektor Industri (Fase-1) Kementerian Perindustrian Tahun 2011, serta Peraturan Menteri ESDM Nomor 13 Tahun 2012 tentang penghematan pemakaian tenaga listrik. Peraturan tersebut bertujuan untuk mengarahkan upaya – upaya dalam optimalisasi energi dan meningkatkan penghematan pemakaian energi listrik secara efisien dan rasional, dan melakukan konservasi energi. Konservasi energi adalah upaya sistematis, terencana, dan terpadu guna melestarikan sumber daya energi dalam negeri serta meningkatkan efisiensi pemanfaatannya.

Maksud dari kegiatan audit energi ini adalah untuk mengetahui penggunaan energi aktual gedung serta mengetahui pilihan ECO (*Energi Conservation Opportunities*) yang paling tepat, tanpa mengurangi kualitas, tingkat kenyamanan. Sedangkan tujuannya adalah sebagai masukan kepada pemangku kepentingan dalam penentuan kebijakan konsumsi energi (efisiensi energi) suatu gedung dalam kaitannya dengan penyediaan dan pengelolaan energi ke arah yang lebih optimal.

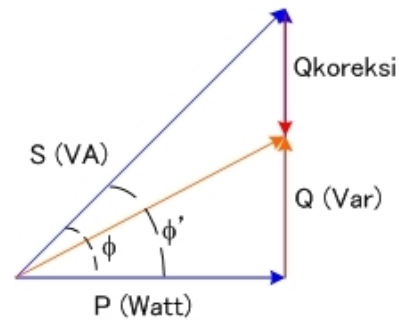
Sebagai upaya nyata proses penghematan energi adalah manajemen energi dan salah satu diantaranya adalah studi awal audit energi. Seperti halnya konsumsi energi listrik di gedung 40,41,42,43 PSTBM, dianggap mempunyai kontribusi yang cukup besar dalam pembayaran tagihan listrik di PSTBM, audit energi merupakan langkah yang tepat untuk dilaksanakan. Adapun kegiatan ini dilakukan pada seluruh ruangan dan area gedung kantor tersebut dengan cara interview dan pengukuran, dimana subyek kajian adalah perangkat konsumsi energi maupun perilaku konsumen sebagai pengguna (*demand*) dan sumber energi sebagai penyedia (*suplay*).

LANDASAN TEORI

1. Energi, Daya dan Faktor Daya

Energi didefinisikan sebagai kemampuan untuk melakukan kerja. Energi memiliki satuan Joule atau Btu. Sedangkan daya didefinisikan sebagai laju energi yang dibangkitkan atau dikonsumsi [1]. Satuan dari daya adalah Joule/detik atau watt. Maka satuan energi listrik adalah watt-detik atau lebih populer dengan *watt-hour*.

Daya ada 3 macam antara lain daya aktif (P), daya reaktif (Q), dan daya semu (S). Hubungan antara daya aktif (P) daya reaktif (Q) dan daya semu (S) dapat dilihat pada Gambar 1 :



Gambar 1. Segitiga Daya

Daya aktif (P) digambarkan dengan garis horizontal yang lurus. Daya reaktif (Q) berbeda sudut sebesar 90° dari daya aktif. Sedangkan daya semu (S) adalah hasil penjumlahan secara vektor antara daya aktif dengan daya reaktif.

Hubungan antara daya, tegangan, arus dan faktor daya dapat dituliskan dengan rumus sebagai berikut:

$$P = VI \cos \phi \quad \dots (1)$$

Sedangkan energi yang dibutuhkan dapat diukur dengan membandingkan P dan t sesuai dengan rumus

$$W = P.t \quad \dots (2)$$

Keterangan:

P	= daya yang dibutuhkan
(watt)	
V	= tegangan (volt)
I	= arus yang mengalir (ampere)
$\cos \phi$	= faktor daya
W	= energi yang dibutuhkan (joule)
t	= waktu yang dibutuhkan (sekon)

2. Beban

Penerangan

Intensitas penerangan harus ditentukan di tempat pekerjaan yang akan dilakukan. Tingkat pencahayaan pada suatu ruangan tergantung pada jenis kegiatan yang dilakukan. Banyaknya cahaya yang dihasilkan oleh suatu lampu disebut fluks luminus dengan satuan lumen. Efisiensi penerangan lampu bertambah dengan bertambahnya daya lampu. Rugi-rugi *ballast* harus ikut diperhitungkan dalam menentukan efisiensi sistem lampu [2].

3. Beban AC

Untuk melakukan audit terhadap sistem AC, diperlukan informasi mengenai keadaan sistem, seperti spesifikasi unit, jumlah unit, periode penggunaan. Pada peralatan pendingin (AC) berusia lebih dari 10 tahun,

pemakaian energi akan lebih besar 30-50% dibandingkan dengan peralatan pendingin terkini. Untuk itu, laksanakan program penggantian peralatan pendingin (AC) dengan pendingin hemat energi dengan teknologi terbaru [3].

4. Definisi Audit Energi

Audit energi secara sederhana dapat didefinisikan sebagai sebuah proses untuk mengevaluasi di mana sebuah bangunan atau gedung yang menggunakan energi, dan mengidentifikasi peluang untuk mengurangi konsumsi [3].

Audit energi awal merupakan pengumpulan data awal, tidak menggunakan instrumentasi yang canggih dan hanya menggunakan data yang sedia. Dengan kata lain audit energi awal merupakan pengumpulan data dimana, bagaimana, berapa, dan jenis energi apa yang dipergunakan oleh suatu fasilitas. Data ini diperoleh dari catatan penggunaan energi tahun atau bulan sebelumnya pada bangunan dan keseluruhan sistem kelengkapannya. Audit energi awal terdiri dari tiga tahap pelaksanaan yaitu:

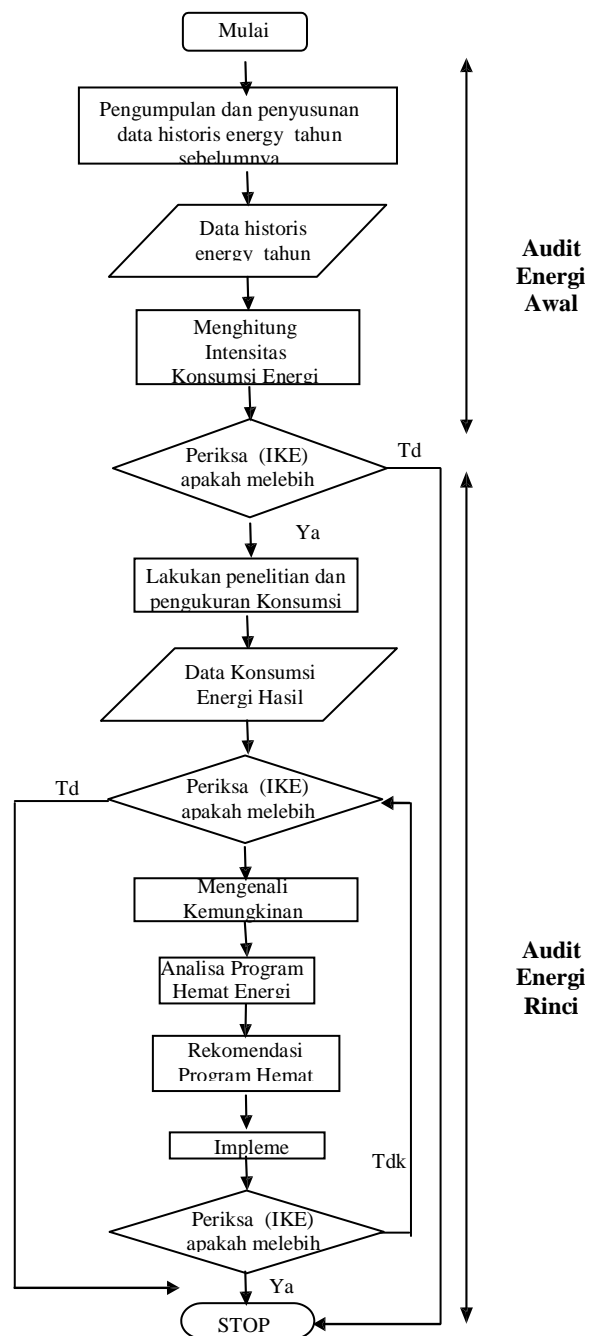
- 1) Melakukan identifikasi berapa jumlah dan biaya energi menurut jenis energi yang dipergunakan oleh bangunan dan kelengkapannya.
- 2) Melakukan identifikasi konsumsi energi per bagian/sistem dari bangunan dan kelengkapannya.
- 3) Mengoreksi masukan energi dan keluaran produksi atau biasa disebut dengan intensitas energi.

Hasil dari audit energi awal berupa langkah-langkah *„housekeeping‘* tanpa biaya atau dengan biaya rendah, dan daftar sumber-sumber pemborosan energi yang nyata. Audit energi memberikan identifikasi tentang perlunya dilakukan audit energi rinci serta ruang lingkupnya.

5. Konsep Audit Energi

Audit energi merupakan usaha atau kegiatan untuk meidentifikasi jenis dan besarnya energi yang digunakan pada bagian-bagian operasi suatu industri/pabrik atau bangunan dan mencoba mengidentifikasi kemungkinan penghematan energi. Sasaran dari audit energi adalah untuk mencari cara mengurangi konsumsi energi persatuan output dan mengurangi biaya operasi. Adapun

sistematika prosedur audit energi dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Prosedur Audit Energi [4]

6. Parameter Audit Energi

6.1 Intensitas Konsumsi Energi (IKE)

IKE listrik merupakan istilah yang digunakan untuk menyatakan besarnya pemakaian energi dalam bangunan gedung per meter persegi per bulan atau pertahun. Nilai IKE ini penting untuk dijadikan tolak ukur dalam menghitung potensi atau energi yang mungkin diterapkan di tiap ruangan atau seluruh area bangunan.

Melalui perbandingan nilai IKE bangunan gedung dengan standar bisa diketahui tingkat efisiensi sebuah ruangan atau keseluruhan gedung dalam proses konservasi energi.

Persamaan yang digunakan untuk menghitung IKE sebagai berikut :

$$\text{IKE (kWh/m}^2\text{)} = \frac{\text{Total konsumsi energi listrik}}{\text{Luas area}} \quad (3)$$

Untuk menetapkan "target" dalam hal ini digunakan nilai IKE dapat menggunakan Pedoman Pelaksanaan Konservasi Energi dan Pengawasannya dilingkungan Departemen Pendidikan Nasional yang diacu dari Standar Nasional Indonesia (SNI) pada Tahun 2004 pada Tabel 1, dan Peraturan Menteri ESDM No. 13 tahun 2012 tentang Penghematan Pemakaian Tenaga Listrik pada Tabel 2.

Tabel 1. Standar Kriteria IKE bangunan gedung berdasarkan Departemen Pendidikan Nasional Tahun 2004

NO	KRITERIA	Ruang Ber-AC (KWh/m ² /bulan)	Ruang Tanpa-AC (KWh/m ² /bulan)
1	Sangat Efisien	4.17 s/d 7.92	0.84 s/d 1.67
2	Efisien	7.92 s/d 12.08	1.67 s/d 2.50
3	Cukup Efisien	12.08 s/d 14.58	-
4	Agak Boros	14.58 s/d 19.17	-
5	Boros	19.17 s/d 23.75	2.50 s/d 3.34
6	Sangat Boros	23.75 s/d 37.75	3.34 s/d 4.17

Tabel 2. Standar Kriteria IKE bangunan gedung berdasarkan Peraturan Menteri ESDM No. 13 tahun 2012 tentang Penghematan Pemakaian Tenaga Listrik

NO	KRITERIA	Gedung Kantor Ber-AC (kWh/m ² /bulan)	Gedung Kantor Tanpa AC (kWh/m ² /bulan)
1	Sangat efisien	< 8.5	< 3.4
2	Efisien	8.5 – 14	3.4 – 5.6
3	Cukup efisien	14 – 18.5	5.6 – 7.4
4	Boros	> 18.5	> 7.4

Melalui perbandingan nilai IKE bangunan gedung dengan standar bisa diketahui tingkat efisiensi sebuah ruangan atau keseluruhan gedung dalam proses konservasi energi. Selanjutnya, nilai IKE yang dihasilkan akan menentukan apakah sebuah bangunan tergolong sangat efisien, efisien, cukup efisien dan sangat boros.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Suplai Energi Listrik Gedung PSTBM – BATAN

Suplai energi listrik gedung PSTBM – BATAN berasal dari PLN dan genset. Penggunaan energi listrik utama menggunakan listrik yang berasal dari PLN dengan trafo distribusi utama berkapasitas 1.000 kVA. Suplai energi listrik dari PLN digunakan untuk menyuplai seluruh

kebutuhan energi gedung PSTBM – BATAN.

Genset berkapasitas 500 kVA digunakan apabila saat terjadi pemadaman listrik oleh PLN dan genset akan otomatis akan menyala, begitu sebaliknya ketika suplai energi listrik dari PLN menyala genset akan mati. Namun kejadian pemadaman listrik oleh PLN sangat jarang terjadi. Pemakaian genset sering digunakan setiap perbaikan-perbaikan pada alat atau komponen sistem tenaga listrik.

Suplai energi yang berasal dari PLN dan genset disalurkan ke *Low Voltage Main Distribution Panel* (LVMDP) yang terletak di gedung 41 – MES. Kemudian dari LVMDP di gedung 41 – MES, daya disalurkan pada gedung 40, 42 dan 43.

2. Spesifikasi Gedung PSTBM – BATAN

Berdasarkan pedoman Peraturan Menteri ESDM Nomor 13 Tahun 2012,

sebelum menghitung intensitas konsumsi energi spesifik, terlebih dahulu menentukan kategori gedung perkantornya, apakah gedung PSTBM – BATAN merupakan gedung perkantoran ber-AC, atau gedung perkantoran tanpa AC,

atau keduanya. Berdasarkan gambar rancang bangunan/*as built drawing* sebagai bahan untuk menghitung luas lantai ber-AC dan tanpa AC per gedung. Berikut adalah data luas lantai gedung 40, 41, 42 dan 43.

Tabel 3. Data luas lantai gedung 40, 41, 42 dan 43

Gedung 40			
Lantai	Luas Total (m ²)	Luas Lantai Ber-AC (m ²)	Luas Lantai Tanpa AC (m ²)
Lantai 1	922.5	866.5	56
Lantai 2	360	197.5	162.5
Lantai 3	40	40	0
Total	1,322.5	1,104	218.5
Persentase (%)	100	83.48	16.52
Gedung 41			
Lantai	Luas Total (m ²)	Luas Lantai Ber-AC (m ²)	Luas Lantai Tanpa AC (m ²)
Lantai 1	171	16	155
Total	171	16	155
Persentase (%)	100	9.35	90.65
Gedung 42			
Lantai	Luas Total (m ²)	Luas Lantai Ber-AC (m ²)	Luas Lantai Tanpa AC (m ²)
Lantai 1	720	486	234
Lantai 2	201.6	172.8	28.8
Total	921.6	658.8	262.8
Persentase (%)	100	71.48	28.52
Gedung 43			
Lantai	Luas Total (m ²)	Luas Lantai Ber-AC (m ²)	Luas Lantai Tanpa AC (m ²)
Lantai 1	300	210	90
Lantai 2	300	210	90
Total	600	420	180
Persentase (%)	100	70	30

Berdasarkan data yang tercantum pada tabel 4, dapat diketahui bahwa gedung 40 – NGH memiliki luas lantai tanpa AC = 16% dan luas lantai ber-AC 83,48%. Untuk Gedung 41 – MES memiliki luas lantai tidak ber-AC = 90,65%. Sedangkan untuk gedung 42 – BSBM memiliki luas lantai tanpa AC = 28,52% dan luas lantai ber-AC = 71,48 %. Untuk Gedung 43 – BTU memiliki luas lantai tanpa AC = 30% dan luas lantai ber-AC = 70%. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa total luas gedung PSTBM adalah 3.025,10 m² dengan rincian luas gedung yang tidak ber-AC adalah 816,3 m² atau 27,07% sedangkan untuk luas gedung ber-AC adalah 2198,8 m² atau 72,92%. Maka berdasarkan Peraturan Menteri ESDM No. 13 tahun

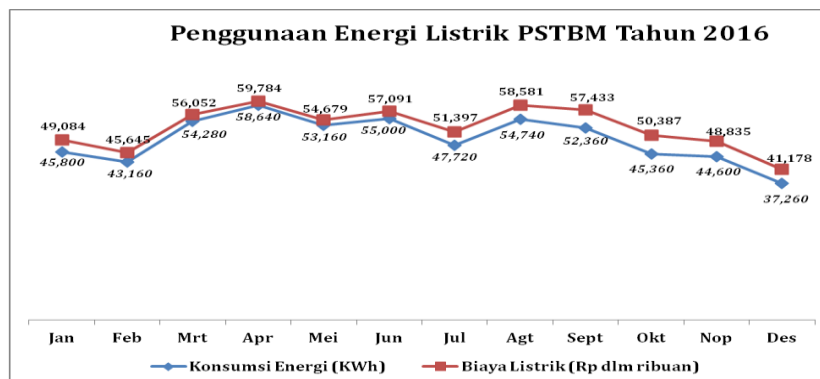
2012, gedung PSTBM masuk dalam kategori gedung perkantoran berAC dan gedung perkantoran tanpa AC.

Pola penggunaan energi listrik

Dalam pelaksanaan audit energi pada bangunan gedung PSTBM, dilakukan pengambilan data sekunder konsumsi energi dari rekening listrik bulanan pada tahun 2016. Data tersebut diperoleh dari rekening pemakaian energi listrik yang dikeluarkan oleh Kepala Sub Bagian Perlengkapan. Gambar 4. adalah data penggunaan energi listrik pada PSTBM Tahun 2016. Dari gambar tersebut dapat diamati bahwa konsumsi energi listrik gedung tersebut pada tahun 2016 setiap bulan berkisar

antara 37,260 kWh hingga 58,640 kWh atau dengan pemakaian energi rata-rata per bulan mencapai 49,340 kWh dan biaya

energi rata-rata sebesar Rp. 1644,47 per kWh.



Gambar 4. Data penggunaan Energi Listrik PSTBM Tahun 2016

3. Analisa Efisiensi Konsumsi Energi Listrik

Gedung PSTBM – BATAN

a) Hasil Perhitungan Daya

Dari perolehan data pengukuran arus selama empat hari pada tanggal 2, 7, 8, 9 bulan Februari 2017, dengan satu kali pengukuran pengambilan data diulangi sebanyak 3 kali, pada pukul 10.00-10.30, pukul 11.00-11.30, pukul 13.00-13.30, pukul 14.00-14.30, dan pukul 15.00-15.30, kemudian menghitung daya aktif, semu dan reaktif, dengan menggunakan persamaan berikut [1] :

- 1) Daya Aktif : $P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \phi$
- 2) Daya Semu : $S = \sqrt{3} \times V \times I$
- 3) Daya Reaktif : $P = \sqrt{3} \times V \times I \times \sin \phi$

maka dapat disimpulkan rerata total keseluruhan daya yang digunakan per tiap gedung dapat dilihat pada Tabel 4 Data Perhitungan Daya (Rerata) berdasarkan Gedung PSTBM dibawah ini

Tabel 4. Data Perhitungan Daya (Rerata) pada Gedung PSTBM – BATAN pada bulan Februari 2017

Gedung	Daya		
	Aktif (kW)	Semu (kVAR)	Reaktif (VA)
GD 40	65.57	66.23	0.66
GD 41	56.75	57.32	0.57
GD 42	56.81	57.38	0.57
GD 43	48.44	48.93	0.49
Total	227.56	229.86	2.3

Dari perhitungan tersebut, diperoleh total daya keseluruhan sebulan adalah 227.56 kW. Jika jumlah jam kerja (operasional kegiatan) gedung PSTBM – BATAN berlangsung selama 8 jam perhari (pukul 07.00 – 15.00), selama 23 hari efektif bekerja dalam sebulan dengan semua peralatan menyala maka total daya per hari adalah : $P = 227,56 \times 8 = 1.820,49$ kWh/hari atau sebesar 41.871,27 kWh/bulan. Dari hasil perhitungan tersebut, maka dapat

dihitung IKE per bulan gedung PSTBM adalah :

$$IKE (KWh/m^2) = \frac{41.871,27 \text{ KWh/m}^2}{13,84 (KWh/m^2)} = 3.025,10 \text{ m}^2$$

dapat dikatakan bahwa penggunaan energi listrik pada PSTBM masuk dalam kategori efisien (8.5 – 14 KWh/m²) berdasarkan Peraturan Menteri ESDM No. 13 tahun 2012, dan cukup efisien (12.08 s/d 14.58 KWh/m²) bangunan gedung

berdasarkan Departemen Pendidikan Nasional Tahun 2004.

b) Analisa Beban Lampu Penerangan

Pada Gedung PSTBM terdapat berbagai macam jenis lampu yaitu lampu *Mercuri* sebesar 700 W – hanya ada di Ged 40 – Lab NGH, lampu TL sebesar 40 W, *Downlight Warm White* 25 W. Total seluruh lampu pada gedung PSTBM (Gd 40,41,43) yang masih menggunakan lampu TL sebesar 40 W sebanyak 335 buah, lampu mercury 700W sebanyak 11 buah, yang

menggunakan LHE sebanyak 153 buah dan hanya gedung 42 yang seluruh ruangan sudah menggunakan LHE.

Berdasarkan hasil pengamatan dilapangan pada gedung PSTBM bahwa pemakaian kebutuhan beban lampu adalah 70% yang beroperasi, dengan jam operasional 8 jam yaitu pukul 07.30 – 15.30 selama 23 hari efektif bekerja dalam sebulan, maka dapat diperkirakan total konsumsi energi sebesar pada beban lampu adalah sebesar 5.386,26 kWh, seperti ditampilkan pada table 5 dibawah ini.

Tabel 5. Total Konsumsi Energi Listrik pada Beban Lampu

Gedung	Total Konsumsi Energi Listrik per Hari (kWh)	Total Konsumsi Energi Listrik per Bulan (kWh)
40	188.85	4,343.62
41	0.81	18.52
42	11.69	268.87
43	32.84	755.25
Total	234.19	5,386.26

Beban yang terbesar terdapat pada gedung 40, hal ini dikarenakan laboratorium NGH - Gd 40 masih menggunakan lampu merkuri 700 watt yang terdapat gedung tersebut dari 16 total lampu merkuri baru 5 lampu yang diganti dengan LHE jenis LED.

c) Analisa Pendingin Ruangan

Untuk pendingin ruangan pada Gedung PSTBM bahwa seluruh ruangan untuk mengatur suhu ruangan Sesuai standar Nasional Indonesia (SNI) berkisar antara 24⁰C sampai dengan 27⁰C [8] . Dari hasil pengamatan dilapangan suhu yang digunakan rata – rata sebesar 25⁰C. Pada gedung 41 ruang panel listrik dan kapasitor bank, serta lab NGH – gedung 40, beroperasi 24 jam dikarenakan untuk menjaga kestabilan suhu pada kapasitor bank, panel, kabel – kabel penghubung dan tabung pemandu

neutron serta peralatan hamburan neutron agar tidak cepat rusak.

Pemasangan AC konvensional menyebabkan pendinginan tidak merata dan pemborosan energi listrik. PK_{AC} yang dibutuhkan pada gedung 40 dan 41 sebesar 201 PK, besarnya kebutuhan PK_{AC} ini dikarenakan pada gedung 40 memiliki sekitar 8 AC yang berkapasitas 20 PK. Sedangkan untuk PK_{AC} pada gedung 42 sebesar 34,25 PK, dan untuk gedung 43 sebesar 24 PK.

Hasil pengamatan dilapangan kebutuhan beban AC yang beroperasi adalah 85% dengan jam operasional 8 jam yaitu pukul 07.30 – 15.30 selama 23 hari efektif bekerja dalam sebulan. Maka dapat diperkirakan konsumsi energi sebesar 30.338,04 kWh, seperti ditampilkan pada table 6 dibawah ini.

Tabel 6. Total Konsumsi Energi Listrik pada Pendingin Ruangan

Gedung	Total Konsumsi Energi Listrik per Hari (kWh)	Total Konsumsi Energi Listrik per Bulan (kWh)
40	1,050.29	24,156.76
41	24.71	568.33
42	145.19	3,339.30
43	98.85	2,273.64
Total	1,319.05	30,338.04

Beban yang terbesar terdapat pada Gedung 40, hal ini dikarenakan pendingin ruangan pada gedung tersebut memiliki 8 pendingin ruangan yang berkapasitas 20 PK.

d) Analisa peralatan elektronik lainnya

Pada Gedung PSTBM terdapat banyak peralatan atau mesin-mesin elektronik penunjang penelitian dari mulai yang berdaya kecil hingga besar seperti komputer, mesin Foto Copy,

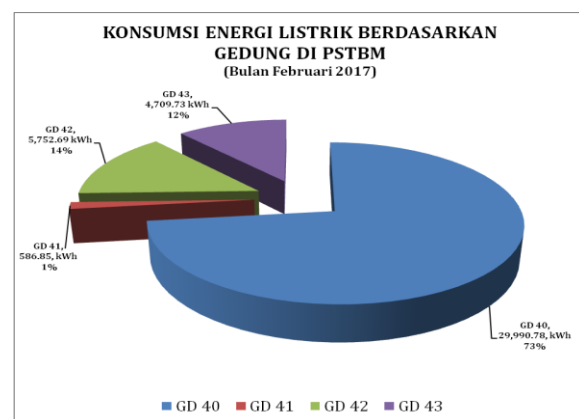
lemari pendingin, televise, dispenser dan lain lain. Rata-rata penggunaan peralatan adalah tentatif tergantung sedang diadakan penelitian atau tidak. Hasil pengamatan dilapangan faktor kebutuhan beban peralatan elektronik lainnya adalah 90% dengan jam operasional 8 jam selama 23 hari efektif bekerja dalam sebulan. Maka dapat diperkirakan konsumsi energi sebesar pada beban peralatan elektronik lainnya sebesar :

Tabel 7 Total Konsumsi Energi Listrik pada peralatan elektronik lainnya

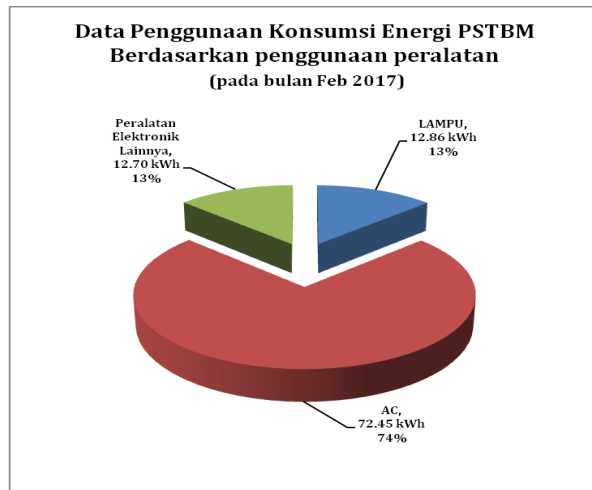
Gedung	Total Konsumsi Energi Listrik per Hari (kWh)	Total Konsumsi Energi Listrik per Bulan (kWh)
40	64.80	1,490.40
42	93.24	2,144.52
43	73.08	1,680.84
Total	231.12	5,315.76

e) Persentase Konsumsi Energi Listrik menurut sektor

Konsumsi energi listrik pada Gedung PSTBM didominasi oleh penggunaan pendingin ruangan senilai 30,338.04 kWh, diikuti oleh penerangan 5,386.26 kWh dan peralatan elektronik lainnya 5.315,76 kWh. Penggunaan daya listrik untuk pendingin ruangan pada gedung 40 sebesar 24.156,76 kWh. Dapat dilihat pada Gambar 5 Total Konsumsi Energi Listrik Berdasarkan Gedung dan Gambar 4 Total Konsumsi Energi Listrik Berdasarkan Pemakaian Peralatan



Gambar 5. Total Konsumsi Energi Listrik Berdasarkan Gedung



Gambar 6. Total Konsumsi Energi Listrik Berdasarkan Pemakaian Peralatan

Berdasarkan data jumlah peralatan seperti lampu penerangan, pendingin ruangan dan peralatan elektronik lainnya, maka dapat dihitung konsumsi beban listrik yang terpakai pada masing-masing gedung PSTBM dapat dilihat pada Gambar 4. Total Pemakaian Konsumsi Energi Listrik berdasarkan Gedung, dimana Gedung 40 merupakan pengguna konsumsi listrik terbesar yaitu 29.990,78 KWh/bulan, jika dihitung nilai IKE didapat sebesar 22,5 KWh/m². Kalau dilihat dari nilai target IKE yang digunakan untuk klasifikasi perkantoran berdasarkan Peraturan Menteri ESDM No. 13 tahun 2012, masuk dalam kategori boros (> 18.5 KWh/m²), begitu pula jika ditinjau Standar Kriteria IKE bangunan gedung berdasarkan Departemen Pendidikan Nasional Tahun 2004 termasuk boros (19.17 s/d 23.75 KWh/m²).

Penggunaan energi listrik yang terbesar pada gedung 40 adalah untuk penggunaan pendingin ruangan yaitu 24,156.76 KWh/bulan, untuk itu perlu dilakukan penghematan energi untuk pendingin ruangan. Berdasarkan data hasil pengecekan lapangan, diperoleh bahwa hampir seluruh AC yang terpasang masih menggunakan teknologi konvensional, kinerja kompresor dikendalikan oleh thermostat dengan aksi kendali ON - OFF dan gas pendingin menggunakan freon jenis R22. Untuk itu perlu dilakukan modifikasi pendingin ruangan dengan Teknologi AC yang terbaru menggunakan gas freon jenis R410 dan pengaturan temperature dikendalikan oleh putaran kompresor dengan aksi kendali Proporsional - Integral - Differensial (PID) yang sepenuhnya dikontrol oleh inverter.

Sebaliknya untuk gedung 41, 42, 43 nilai IKE

masuk dalam kategori sangat efisien baik itu berdasarkan Peraturan Menteri ESDM No. 13 tahun 2012 (< 8.5 KWh/m²), dan Standar Kriteria IKE bangunan gedung berdasarkan Departemen Pendidikan Nasional Tahun 2004 (4.17 s/d 7.92 KWh/m²).

Tetapi jika dilihat secara keseluruhan target nilai IKE pada gedung PSTBM sebesar 13,56 KWh/m², nilai IKE masuk dalam kategori efisien berdasarkan Peraturan Menteri ESDM No. 13 tahun 2012 (8.5 - 14 KWh/m²), dan cukup efisien berdasarkan Standar Kriteria IKE bangunan gedung berdasarkan Departemen Pendidikan Nasional Tahun 2004 (12.08 s/d 14.58 KWh/m²).

KESIMPULAN

Hasil dari perhitungan target nilai Intensitas Konsumsi Energi Gedung PSTBM sebesar 13,56 KWh/m², masuk dalam kategori efisien (8.5 - 14 KWh/m²) berdasarkan Peraturan Menteri ESDM No. 13 tahun 2012, dan cukup efisien (12.08 s/d 14.58 KWh/m²) berdasarkan Standar Kriteria IKE bangunan gedung berdasarkan Departemen Pendidikan Nasional Tahun 2004.

Konsumsi energi listrik berdasarkan pengambilan data dan perhitungan pada gedung PSTBM dengan asumsi penggunaan 8 jam perhari (pukul 07.00 - 15.00), selama 23 hari efektif bekerja dalam sebulan dengan semua peralatan menyala, maka total daya per hari adalah : $P = 227,56 \times 8 = 1.820,49$ kWh/hari atau sebesar 41.871,27 kWh/bulan.

Dimana konsumsi energi listrik paling besar adalah gedung 40 dengan konsumsi energi listrik sebesar 29.990,78 kWh/bulan atau sekitar 73 %. Dan konsumsi energi listrik paling kecil adalah pada gedung 41, dengan konsumsi energi listrik sebesar 586.85 kWh/bulan atau sekitar 1 %.

Sektor yang paling banyak mengonsumsi energi listrik pada gedung PSTBM adalah pendingin ruangan sebesar 30.338,04 kWh/bulan atau sebesar 74%, maka diperlukan dilakukan modifikasi pendingin ruangan dengan Teknologi AC yang terbaru menggunakan gas freon jenis R410, serta penghitungan ulang mengenai kebutuhan pendingin ruangan dengan luas ruangan dan jumlah pegawai yang bekerja diruangan tersebut.

Untuk itu perlu dilakukan Audit energi rinci untuk membuat rekomendasi program manajemen energi di PSTBM.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih diucapkan kepada Bpk Drs. Gunawan, M.Sc selaku Kepala Pusat Sains Teknologi Bahan Maju, Bpk Uteng Tarmulah selaku Kepala Bidang Keselamatan Kerja dan Keteknikan, Bpk Agus Sunardi, S.ST selaku Ka.Sub Keteknikan, serta teman sejawat Sub Keteknikan yang telah membantu dalam penyusunan makalah ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. Zuhail. Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya, PT Gramedia Pustaka Utama Jakarta, 1995.
2. Devki Energi Consultancy Pvt. Ltd. *Best Practice Manual Lighting*. Vadodara, 2006.
3. Thumann, Albert, P.E., C.E.M. & William J. Younger, C.E.M. *Handbook Of Energi Audits Sixth Edition*, Georgia: The Fairmont Press, inc, 2003..
4. Badan Standardisasi Nasional. *SNI 03-6196-2000, Prosedur Audit Energi Pada Bangunan Gedung*. Jakarta: BSN. (ID): Departemen Pendidikan Nasional, 2000.
5. P. Van Harten. 2002. *Instalasi Listrik Arus Kuat 2*. Trimitra Mandiri.
6. Dewan Energi Nasional. 2014. *Outlook Energi Indonesia 2014*
7. Pemerintah Republik Indonesia, Instruksi Presiden Nomor 13 Tahun 2011 tentang penghematan energi dan air kepada seluruh aparaturnegara
8. Kementrian ESDM, Peraturan Menteri ESDM No. 13 tahun 2012 tentang Penghematan Pemakaian Tenaga Listrik.
9. Pemerintah Republik Indonesia, Undang Undang Republik Indonesia Nomor 30 Tahun 2007 Tentang Energi.
10. Kementrian ESDM, Peraturan Menteri ESDM Nomor 14 Tahun 2012 Tentang Manajemen Energi.

PENGAMBILAN ION PERAK DARI LIMBAH ELEKTROLIT PROSES OKSIDASI ELEKTROKIMIA SOLVEN ORGANIK

Sutoto

Pusat Teknologi Limbah Radioaktif-BATAN

sutoto@batan.go.id

ABSTRAK

PENGAMBILAN ION PERAK DARI LIMBAH ELEKTROLIT PROSES OKSIDASI ELEKTROKIMIA SOLVEN ORGANIK. Pengolahan limbah organik dengan oksidasi Ag^{+2} dilakukan dalam sel elektrokimia bersekat. Sebagai anolit adalah $AgNO_3$ 0,05M dalam 4M HNO_3 dan katolit adalah HNO_3 12 M. Proses oksidasi limbah terjadi di bilik anoda dan laju reaksinya dipengaruhi oleh besarnya kandungan garam terlarut. Batas maksimum kandungan garamnya adalah 30 g/l. Setelah kandungan garam terlarut maksimum maka anolit tidak berfungsi sebagai pembangkit oksidator Ag^{+2} yang selanjutnya dilimbahkan. Komposisi kandungan limbahnya adalah kation-kation kontaminan hasil oksidasi dan anolit $AgNO_3$. Oleh karena nilai ekonomis $AgNO_3$ relatif tinggi, maka diupayakan pengambilannya dengan cara elektrodeposisi. Percobaan elektrodeposisi dilakukan menggunakan elektroda Pt dengan sampel limbah simulasi $AgNO_3$ 0,05 M dalam 4 M HNO_3 . Untuk optimalisasi dilakukan dengan memvariasikan kuat arus, yaitu : 1 A , 2 A dan 3 A dengan waktu pengaliran bervariasi dari 1 sampai 30 menit. Hasil yang diperoleh adalah kemampuan pengambilan Ag dari limbah elektrolit sistem pembangkitan oksidator Ag^{+2} pengolahan limbah solven organik. Hasil pengambilan Ag optimum dengan kuat arus elektrodeposisi 2 A adalah 0,378 g. Metode elektrodeposisi untuk pengambilan Ag dapat langsung dioperasikan dibilik anode dengan cara membalik muatan arus elektrodanya.

Kata kunci : elektrokimia, limbah organik

ABSTRACT

RECOVERY OF SILVER IONIC FROM SPENT ELECTROLYT OF ELECTROCHEMICAL OXYDATION OF ORGANIC SOLVENT WASTES. The treatment of organic waste by oxidation Ag^{+2} was done in the compartment electrochemical cell. As anolyt is $AgNO_3$ 0,05M in 4M HNO_3 and 12 M HNO_3 12 M used as catholyt. Oxidation process was occur in compartment anode with reaction rate was determine in much salt soluting. The maximum salt contain is 30 g/l. After can't be used to generate of Ag^{+2} and it anolyt was became classified waste. The composition of waste content is an metal chations contaminant produced of distruction oxydation process and an $AgNO_3$ catholyt. Because the $AgNO_3$ have still high economically relative, so recovery its by electrodeposhing mechanism will challenge done. Electrodeposhing experiment were done with used of Pt electrodes on stimulate samples 0,05 M $AgNO_3$ under of 4 M HNO_3 solution. The optimized was determine by using of current intensity various at 1 A , 2 A and 3 A belong time 1 to 30 minutes. Result of the reasearch is know of capability Ag recovery from electrolyt waste generating of Ag^{+2} oxydater. The Ag recovery optimum was produce from electrodeposhing sample at current intensity 2 A belong 30 menit charging. The electrodeposhing can be setting directly at anode compartment with their potensial electrode opposite.

Keyword ; electrochemical, organic waste

PENDAHULUAN

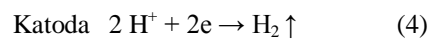
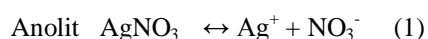
Keselamatan radiasi adalah faktor utama yang harus diperhatikan di kegiatan yang melibatkan pemakaian zat radioaktif atau bahan nuklir. Sistem ALARA, diterapkan seoptimal mungkin dan dirangkum dalam juklak/juknis sehingga mudah dipahami pekerja [1]. Jenis dan kuantitas zat radioaktif yang akan dipakai terlebih dahulu diformulasikan seminimal mungkin, sehingga limbah yang timbul relatif kecil dan mudah pengelolaannya. Semua limbah

radioaktif harus dikelola secara baik sehingga tidak membahayakan lingkungan disekitarnya. Proses pemisahan dan pemurnian bahan-bahan nuklir banyak memakai solven organik sebagai pengekstraksi. Pada pemakaian secara kontinyu dan waktu panjang maka terjadi penurunan efisiensi fungsinya. Kondisi jenuh atau adanya kerusakan gugus fungsi solven adalah menjadi penyebab rendahnya hasil proses. Mengganti dengan solven baru atau diregenerasi adalah penanggulungannya. Solven organik bekas

muncul sebagai limbah yang harus dikelola secara baik.

Tujuan pengolahan limbah adalah mengisolasi limbah sehingga tidak berpotensi kontaminasi yang membahayakan pekerja dan lingkungan. Mereduksi volume limbah semaksimal mungkin dan mengisolasi sekuat mungkin hasil olahan (*conditioning*) supaya terjadi kebocoran di fasilitas penyimpanan adalah tujuan utama dari pengelolaan limbah yang terus dikembangkan. Limbah solven organik dikelompokkan sebagai limbah terbakar, sehingga berorientasi diolah secara thermal distruksi dalam tungku insenerator. Hasil pengolahannya berupa abu dengan volume relatif kecil sehingga tidak membutuhkan ruangan penyimpanan yang besar. PTLR-Batan telah mengoperasikan insenerator untuk pengolahan limbah padat terbakar dan cair organik. Kriteria keberterimaan limbah berdasarkan sistematika pengolahannya dibuat untuk mempermudah inventarisasi dan pengelompokan limbah serta efisiensi pengolahannya [2]. Oleh karena sistem insenerasi beroperasi ekonomis secara kontinyu, maka dibutuhkan tidak sedikit umpan limbah yang dipersiapkan. Kapasitas pengolahan sistem insenerasi relatif besar sehingga membutuhkan waktu panjang dalam mengumpulkan umpan limbahnya.

PTLR -Batan bertanggung jawab mengelola semua limbah yang berada di Indonesia. Sebagai salah satu konsekuensi yang timbul adalah kesiapan sistem beroperasi dengan performance optimal. Maintenance dan kalibrasi peralatan untuk mendapatkan hasil kinerja optimal dilakukan secara berkala sesuai prosedur yang berlaku. Pengembangan metode proses yang mendukung tugas utama dilakukan secara terintegrasi. Salah satu diantaranya adalah pengembangan sistem distruksi molekul limbah secara elektrokimia menggunakan oksidator Ag^{+2} . Sasaran yang diharapkan adalah ketersediaan alternatif metode pengolahan limbah. PTLR sudah mewujudkan hasil rancangan sistem pengolahan limbah organik seperti diatas dan terapkan menggunakan berbagai jenis filter, diantaranya adalah : filter keramik dan nafion [3]. Ilustrasi bagan sistem dan hasil rangkaian sistem terlihat pada Gambar 1 dan Gambar 2. Mekanisme pembangkitan oksidator Ag^{+2} dengan cara elektrokimia adalah sebagai berikut :



Adapun mekanisme pembentukan oksidator Ag^{+2} adalah mengikuti reaksi hidrolisis elektrolit $AgNO_3$ dalam HNO_3 sebagai anolit dan HNO_3 sebagai katolit yang ditempatkan dalam dalam sel elektrokimia bersekat membran filter keramik. Reaksi oksidasi yang terjadi di sekat anoda dengan elektrolit $AgNO_3$ dalam HNO_3 adalah terbentuknya Ag^{+2} . Proses tersebut berjalan karena mobilitas gerak Ag^+ terhalangi tidak dapat menerobos lobang pori-pori keramik dan terakumulasi disekitar permukaan anoda. Akibat dari proses oksidasi berkelanjutan membuat semakin besar kandungan oksidator Ag^{+2} terbentuk, seperti Persamaan 1 dan 2. Reaksi yang terjadi di katode dengan elektrolit $12M HNO_3$ adalah pembentukan gas hirogen. Oksidator Ag^{+2} yang dihasilkan di bilik anolit selanjutnya dapat dipakai untuk mendistruksi limbah organik termasuk solven bekas. Proses oksidasi limbah dilakukan di bilik anolit, sehingga kontaminan limbah akan terlepas dan bercampur dengan anolit sebagai garam. Semakin panjang waktu reaksi berjalan, maka kandunagn garam di anolit akan semakin besar. Pada batas kandungan 30 g/l akan mempengaruhi proses pembentukan oksidator dan berakibat reaksi oksidasinya berjalan lambat. Diperlukan perlakuan regenerasi elektrolit atau penggantian elektrolit baru dengan melimahkan elektrolit dengan kandungan garam logam kontaminan.

Nilai ekonomis perak relatif besar sehingga perlu diupayakan pengambilannya. Proses rekoveri yang dilakukan berperan sekalian sebagai pengolahan limbah, karena hasil akhirnya adalah terpisahnya senyawa - senyawa aktif (kontaminan) dan endapan perak. Oleh karena itu perlu dilakukan percobaan rekoveri Ag dari sovent bekasnya. Sebagai dasar penentuan parameter percobaan adalah Persamaan 5, yaitu [4] :

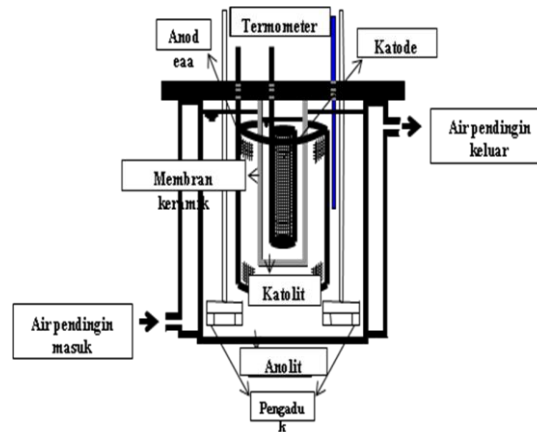
$$W = (I t M) / (nF) \quad (5)$$

Dimana W adalah berat hasil pengendapan kation di permukaan katoda

I adalah besarnya arus listrik (*amper*)

t adalah lama waktu pengaliran arus listrik (*detik*)

M adalah besarnya molaritas elektrolit limbah



Gambar.1 Bagan sistem elektrokimia pembangkitan oksidator Ag^{+2}

Tabel 1. Berbagai jenis logam/kontaminan dan diameter ionnya [5]

No atom	Elemen	Ion	Radius ion, nm
27	Cobalt	Co^{+2}	0,082
		Co^{+3}	0,065
38	Strontium	Sr^{+2}	0,127
47	Argentum	Ag^{+} Ag^{+2}	0,113
55	Cesium	Cs^{+}	0,165
58	Cerium	Ce^{+3}	0,118
		Ce^{+4}	0,102
92	Uranium	U^{+4}	0,105

Tabel.2 Nilai berbagai potensial elektroda standar logam terhadap elektroda hydrogen[5]

Reaksi Oksidasi	Potensial elektroda terhadap elektroda hidrogen , E^0 (volt)
$Au \rightarrow Au^{+3} + 3 e^{-}$	+ 1,498
$2 H_2O \rightarrow O_2 + 4 H^{+} + 4 e^{-}$	+ 1,229
$Pt \rightarrow Pt^{+2} + 2 e^{-}$	+1,220
$Ag \rightarrow Ag^{+} + e^{-}$	+ 0,799
$Fe^{+2} \rightarrow Fe^{+3} + e^{-}$	+0, 771
$Cu \rightarrow Cu^{+2} + 2 e^{-}$	+0,337
$H_2 \rightarrow 2H^{+} + 2e^{-}$	0
$Pb \rightarrow Pb^{+2} + 2 e^{-}$	+0,126
$Sn \rightarrow Sn^{+2} + 2 e^{-}$	+0,136

TATA KERJA

Bahan :

- Limbah anolit hasil proses dekontaminasi solven

- Larutan Anolit berisi $AgNO_3$ 0,05 M dalam 4 M HNO_3
- Larutan Katolit HNO_3 12 M
- Aceton dan akuades

Peralatan

- Sel elektrokimia pembangkit oksidator Ag^{+2} , seperti pada Gambar 1.
- Kertas saring

- Timbangan listrik
- Oven
- Generator arus DC

Metode

Percobaan pengambilan perak dari limbah elektrolit dilakukan secara *electrodeposhing* menggunakan 2 buah elektroda Pt berbentuk silinder. Letak posisi kedua elektroda diatur sedemikian rupa elektroda negatif (katoda) berada di dalam silinder permukaan elektroda positif (anoda) dengan jarak tertentu dan tidak saling bersinggungan. Proses *electrodeposhing* dilakukan dengan cara mencelupkan kedua pasangan elektroda ke dalam botol sampel yang berisi 500 ml limbah. Selanjutnya, kedua ujung elektrodanya dihubungkan dengan generator listrik arus searah berkapasitas maksimum 3 ampere. Untuk mengoptimalkan proses reaksi redoks, sample diaduk memakai pengaduk magnet dengan laju putaran 400 rpm. Selama proses *electrodeposhing* terbentuklah endapan Ag yang menempel di katoda dan sebagian menggumpal di dasar larutan. Hasil endapan Ag dipisahkan dengan cara penyaringan, dicuci dan dikeringkan dalam oven pada temperatur 110 °C selama 1 jam. Selanjutnya hasil pengeringan ditimbang untuk mengetahui beratnya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Alur timbulnya limbah elektrolit dari proses pengolahan/dekontaminasi limbah organik

Tahapan pengembangan sistem pengolahan limbah organik dan dekontaminasi secara oksidasi elektrokimia PTLR dilakukan mengikuti bagan sistem proses pembangkitan oksidator Ag^{+2} , komponen peralatan utamanya adalah ; bejana berpendingin, pengaduk, bilik anolit-katolit, filter keramik dan generator arus. Semua bagian tersebut terlihat seperti pada Gambar. 1 dan hasil konstruksi untuk percobaannya diwujudkan seperti pada Gambar 2.



Gambar.2 Percobaan dekontaminasi solven organik (TBP) dengan oksidasi Ag^{+2}

Sistem peralatannya tersebut dibuat dari bahan kaca pyrex dan poly propilen yang tahan terhadap oksidator asam dan Ag^{+2} . Membran filtrasi yang merupakan sekat pembatas kedua bilik anoda dan katoda dibuat dari keramik dengan porositas lebih kecil dari diameter ion Ag^{+} , seperti pada Tabel. 1. Tujuannya adalah untuk membatasi difusi ion Ag^{+1} bergerak sampai permukaan katoda. Dampak akibat yang terjadi adalah Ag^{+1} mengalami oksidasi berkelanjutan, sehingga membentuk Ag^{+2} yang dimanfaatkan sebagai oksidator limbah. Untuk menjaga kenaikan temperatur yang timbul selama reaksi oksidasi berlangsung, maka sistem dilengkapi dengan sistem pendinginan. Sedangkan pemilihan bahan elektroda adalah Pt(platina) didasarkan dari nilai potensial elektrodanya yang besar, yaitu +1,220 volt sehingga tahan terhadap terjadinya korosi bahannya, berbagai nilai potensial elektroda terlihat pada Tabel. 2 Logam emas (Au) juga potensial dapat dipakai sebagai bahan elektroda yang baik. Reaksi pembentukan oksidator Ag^{+2} berjalan di bilik anode, yang ditandai dengan adanya perubahan warna bening menjadi hitam. Semakin panjang waktu pengaliran arus polarisasinya terlihat tingkat warna kehitamannya meningkat. Kenaikan temperatur elektrolit dijaga sekecil mungkin terjadi, yaitu untuk menghindari terjadinya penguapan. Optimalisasi reaksi oksidasi limbah juga diupayakan dengan perlakuan pengadukan pada kecepatan putaran tertentu. Pada percobaan terdahulu sehingga didapatkan limbah elektrolit yang akan diambil kandungan peraknya, didapatkan bahwa kondisi pengadukan 400 rpm adalah optimum untuk mendukung reaksi oksidasi limbah. Pada kondisi tersebut didapatkan komposisi campuran homogen antara anolit dengan limbah. Interaksi tumbukan limbah dengan oksidator berjalan baik dan mengakibatkan terjadinya proses distruksi limbah. Pengaruh kecepatan pengadukan adalah

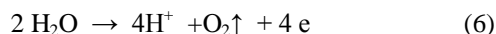
besar, yaitu berhubungan dengan proses difusi ion yang ada di larutan. Akibat pengadukan berkecepatan tinggi dapat mengakibatkan terjadinya bidang *cortex* larutan (pusaran permukaan larutan mengerucut). Pada kondisi tersebut terjadi penurunan permukaan elektrolit diantara kedua elektrodanya, sehingga mobilitas difusi ionnya rendah.

Pengambilan perak dari limbah elektrolit dekontaminasi secara elektrodeposing

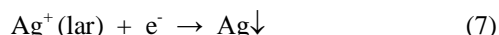
Percobaan pengambilan perak dari limbah elektrolit pembangkit oksidator Ag^{+2} dilakukan dengan sampel simulasi anolit. Isi kandungan elektrolitnya dibuat sama, yaitu 0,05 M $AgNO_3$ dalam 4 M HNO_3 dan dilakukan dalam 1 bilik. Keberadaan kontaminan limbah terlarut hasil dekontaminasinya (polutan) tidak diteliti pengaruhnya, karena diperkirakan tidak memberikan hasil yang jauh berbeda. Nilai α (derajat ionisasi) $AgNO_3$ relatif lebih besar dari pada garam-garam kontaminan terbentuk. Oleh karena Ag^+ bersifat monovalen dengan ukuran ion lebih kecil dibanding kation-kation kontaminan, maka mobilitas dan gerak polarisasi ke katoda lebih cepat[4]. Proses reduksi Ag^+ berjalan dan endapannya dapat diambil dari permukaannya katoda.

Proses pengambilan Ag secara elektrodeposing berjalan setelah kedua elektroda dimuati arus listrik searah. Fenomena reaksi redok di permukaan elektroda terjadi dengan

ditandai keluarnya gelembung-gelembung gas dari permukaan elektroda positif (anoda). Semakin lama waktu pengaliran arusnya, maka semakin besar jumlah gelembung gas yang keluar dari anoda. Gelembung tersebut adalah oksigen sebagai hasil reaksi hidrolisis air. Reaksi REDOKS yang terjadi seperti terlihat pada Persamaan 6 dan Persamaan 7 dibawah :



di anoda $E_{oks} = -1.23$ volt



di katoda

Pada percobaan elektroposing dengan kuat arus 2 ampere, larutan elektrolit berubah warna dari bening menjadi keruh dan terbentuk endapan di permukaan katoda. Semakin panjang waktu pengaliran arus, terlihat endapan putih keabu-abuan menempel dan sebagian jatuh ke permukaan gelas beker. Endapan tersebut adalah logam perak yang terambil karena proses elektrodeposisi di katoda. Gumpalan endapan Ag semakin besar jatuh ke bawah. Pada akhir percobaan elektrodeposisi, semua endapan Ag yang terbentuk dikumpulkan dengan cara penyaringan kemudian dicuci menggunakan akuades dan acetone. Selanjutnya ditentukan beratnya secara penimbangan. Hasil elektrodeposisi yang dihasilkan dari perlakuan bervariasi kuat arus dari 1 A ; 2A dan 3 A adalah terlihat pada Tabel 3, Tabel 4 dan Tabel 5.

Tabel. 3 Hasil elektrodeposing Ag pada berbagai pengaturan waktu dengan kuat arus 1 ampere

Waktu pengaliran arus (menit)	Berat perak terambil di katoda (gram)
1	0,008
5	0,043
10	0,092
15	0,157
20	0,238
30	0,312

Tabel. 4 Hasil elektrodeposing Ag pada berbagai pengaturan waktu dengan kuat arus 2 ampere

Waktu pengaliran arus (menit)	Berat perak terambil di katoda (gram)
1	0,011
5	0,064
10	0,129
15	0,180
20	0,249
30	0,378

Tabel. 5 Hasil elektrodeposhing Ag pada berbagai pengaturan waktu dengan kuat arus 3 ampere

Waktu pengaliran arus (menit)	Berat perak terambil di katoda (gram)
1	0,009
5	0,056
10	0,128
15	0,179
20	0,243
30	0,373

Dari ketiga perlakuan diatas dapat dikemukakan bahwa hasil elektrodeposisi dengan kuat arus 2 ampere selama 30 menit adalah paling optimum, yaitu 0,378 g.

Rancangan efisiensi proses pengambilan perak dari limbah elektrolit

Bahwa proses distruksi limbah solven dengan oksidator Ag^+ dilakukan di bilik anoda dengan elektrolit generator Ag^+ adalah 0,05 M $AgNO_3$ dalam 4 M HNO_3 . Pasca kandungan garam hasil distruksinya mencapai 30 g/l dan elektrolit diklasifikasi sebagai limbah, maka limbahnya harus diolah. Pengolahan secara singkat dan efisien dapat dilakukan seperti pada percobaan yang telah dilakukan diatas. Pelaksanaan elektroeposing dilakukan langsung di bejana anolit dengan menambahkan sebuah elektroda sejenis (Pt). Selanjutnya, dengan memberikan muatan listrik dan pengadukan dapat dilakukan proses elektrodeposisinya. Endapan Ag dapat diambil dari permukaan katoda, sedangkan elektrolit tersisanya dapat dilimbahkan. Pelaksanaannya cepat karena tidak membutuhkan perlakuan pemindahan limbah (mobilisasi) yang berpotensi terjadinya penceceran/tumpah.

KESIMPULAN

Pengambilan perak dari limbah elektrolit dapat dilakukan dengan metode elektrodeposing menggunakan bahan katoda platina. Pada percobaan dengan variasi kuat arus 2 amper selama 30 menit didapatkan endapan Ag

yang optimal, yaitu 0,378 g. Diperlukan percobaan lanjutan untuk memperoleh rekoveri Ag optimal dengan meningkatkan kuat arus dan waktu elektrodeposing. Dibutuhkan sistem generator arus yang lebih besar.

DAFTAR PUSTAKA

1. PERKA BAPETEN " Ketentuan Keselamatan Pengelolaan Limbah Radioaktif", SK Bapeten No. 03/Ka-Bapeten/V-99
2. PTLR-BATAN " Keberterimaan Limbah Radioaktif Terbakar " P.004/BN 0403/TLR, 1Januari 2017.
3. MULYONO DARYOKO, SUTOTO " Peruraian Limbah Organik Radioaktif Cair dengan Cara Elektrokimia dalam Sel yang Berkapasitas Satu Liter, Prosiding Seminar Nasional ke 42, Jaringan Kerjasama Kimia Indonesia, Yogyakarta, 06 Agustus 2009.
4. KHOPKAR S. M. "Konsep Dasar Kimia Analitik" Penerbit Universitas Indonesia, Jakarta, 1990.
5. WILLIAM F. SMITH "Principles of Materials Science And Engineering" McGraw- Hill, Inc, International Edition, USA,1996.
6. BENEDICT M, PIGFORD TH, LEVI HW " Nuclear Chemical Engineering" McGraw Hill Book Company, Second Edition, New York, 1987.

EVALUASI PENGOLAHAN LIMBAH RADIOAKTIF CAIR SECARA EVAPORASI

Bambang Sugito

PTLR-BATAN Kawasan Puspipstek Setu Tangerang Selatan

ABSTRAK

EVALUASI PENGOLAHAN LIMBAH RADIOAKTIF CAIR SECARA EVAPORASI. Unit evaporasi di bangun untuk mengolah limbah radioaktif cair aktivitas rendah dan sedang yang berasal dari Pusat Reaktor Serba Guna (PRSG) beserta laboratorium pendukungnya. Limbah radioaktif cair sebelum di evaporasi terlebih dahulu dilakukan *pretreatment* seperti pengaturan pH serta homogenisasi. Limbah radioaktif cair dari PRSG memiliki karakteristik yang sesuai untuk diolah secara evaporasi, seperti aktivitas : $10^{-6} \text{ Ci/m}^3 < \text{aktivitas beta} > 2. 10^{-2} \text{ ci/m}^3$, tidak mengandung bahan organik, tidak mengandung bahan yang mudah meledak, tidak korosif dan lain-lain. Proses evaporasi dikendalikan melalui panel komando evaporasi I 22001. Operasi evaporasi yang tidak kontinyu karena kerusakan Boiler mengakibatkan penunjukan parameter ukur kurang meyakinkan, selain itu umur evaporasi yang sudah lebih dari 25 tahun perlu mendapat perhatian agar penunjukan parameter ukur masih sesuai standar yang ditetapkan. Hal ini dilakukan dengan membandingkan catatan penunjukan parameter ukur dengan standar alat proses evaporasi. Selama tahun 2016 evaporator bisa mengolah limbah radioaktif cair sebanyak 66 m^3 dan penunjukan masih sesuai dengan standar alat.

Kata Kunci : evaporasi, pengolahan limbah, radioaktif cair

ABSTRACT

EVALUATION OF RADIOACTIVE WASTE TREATMENT IN EVAPORATION. The evaporative unit is built to treat the low and medium activity liquid radioactive waste from the Multipurpose Reactor Center (PRSG) and its supporting laboratory. Liquid radioactive wastes prior to evaporation are pretreatment such as pH adjustment and homogenization. The liquid radioactive waste of the PRSG has the appropriate characteristics for evaporative processing, such as: $10^{-6} \text{ Ci / m}^3 < \text{beta activity} > 2. 10^{-2} \text{ ci / m}^3$, contains no organic material, does not contain explosive materials, not corrosive and others. The evaporation process is controlled through command panel evaporation I 22001. Non-continuous evaporative operation due to Boiler damage resulted in the appointment of less convincing parameters, in addition to the age of evaporation that has been more than 25 years need attention so that the measurement parameters are still in accordance with established standards. This is done by comparing the records of reference parameters to the standard evaporation tool. During the year 2016 evaporator can process liquid radioactive waste as much as 66 m^3 and the appointment is still in accordance with the standard tool.

Keywords : evaporation, waste managemen, liquid radioactive

PENDAHULUAN

Pemanfaatan teknologi nuklir pada saat ini semakin berkembang dan maju. Teknologi nuklir banyak digunakan di bidang industri, kedokteran, dan kegiatan penelitian dan pengembangan. Di bidang industri, sumber-sumber radiasi misalnya Co-60, Cs -137, Ir-192 banyak digunakan untuk keperluan sterilisasi alat kesehatan dan pengawetan bahan makanan, *level gauge*, *thickness gauge*, uji tak merusak/ radioografi dan lain-lainnya. Dalam bidang kedokteran, pemanfaatan zat radioaktif digunakan pada kegiatan radioterapi untuk membunuh sel-sel kanker atau tumor

Disamping memberikan manfaat yang sangat besar, pemanfaatan teknologi nuklir juga berpotensi menimbulkan limbah radioaktif yang berbahaya bagi masyarakat dan lingkungan. Limbah radioaktif didefinisikan sebagai zat radioaktif dan bahan serta peralatan yang telah terkena zat radioaktif atau menjadi radioaktif

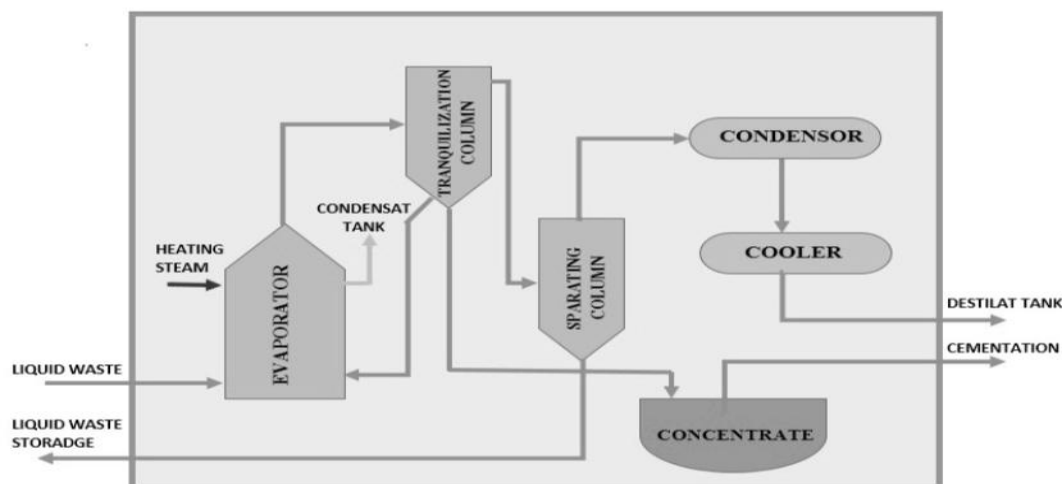
karena pengoperasian instalasi nuklir yang tidak dapat digunakan lagi.[1]

Landasan hukum tentang pengelolaan limbah radioaktif di Indonesia selain UU No. 10 Tahun 1997 tentang Ketenaganukliran juga Peraturan Pemerintah No. 27 Tahun 2002 tentang pengelolaan limbah radioaktif yang telah diamandemen menjadi Peraturan Pemerintah No. 61 Tahun 2013 tentang Pengelolaan Limbah Radioaktif [2]. Limbah radioaktif secara umum di bedakan menjadi beberapa macam, yaitu padat, cair, semi cair dan gas serta diklasifikasikan dalam jenis limbah radioaktif tingkat rendah, tingkat sedang, dan tingkat tinggi [3]. Limbah radioaktif ini harus dikelola sehingga tidak membahayakan atau menimbulkan dampak negatif bagi manusia dan lingkungan. Pengolahan limbah padat dan cair dilakukan melalui proses reduksi volume, kemudian dilanjutkan dengan pengungkungan unsur radioaktifnya menggunakan bahan matriks.

Selama proses evaporasi parameter ukur dicatat dalam *log sheet* proses tiap jam, hasil dari pencatatan ini akan jadi acuan untuk menilai apakah parameter ukur, indikator- indikator operasi masih berfungsi normal atau ada kelainan yang harus segera ditindaklanjuti. Limbah radioaktif cair selain diolah dengan cara evaporasi, bisa juga diolah menggunakan Penukar Ion (*Ion Exchange*), karakteristik limbah radioaktif cair yang bisa diolah dengan penukar ion, agar hasilnya maksimal hampir sama dengan limbah cair yang diolah dengan evaporasi,

ditambah dengan tidak mengandung logam-logam berat.

Kegiatan ini dilakukan untuk mengetahui operasi evaporasi selama proses dengan melihat besaran nilai parameter ukur yang ditunjukkan pada panel evaporasi dibandingkan dengan batas kerja operasi unit evaporasi. Salah satu contoh limbah cair tingkat rendah dan sedang yang harus diolah di PTLR adalah limbah cair yang ditimbulkan dari pengoperasian reaktor serbaguna GA. Siwabessy (RSG - GAS), limbah tersebut diolah dengan cara Evaporasi.



Gambar 1. Alur Proses Evaporasi

Evaporasi adalah salah satu cara untuk mengolah limbah radioaktif cair dengan cara penguapan. Limbah direduksi dalam evaporator, uap yang terbentuk dipisahkan dan diembunkan, maka diperoleh konsentrat yang mengandung semua unsur radioaktif dalam limbah cair, sedang embunan yang dihasilkan merupakan cairan yang diharapkan bebas dari semua unsur radioaktif dan bisa dibuang ke lingkungan setelah semua persyaratan dipenuhi. Alur proses evaporasi diberikan pada Gambar 1.

Limbah radioaktif cair di pompa ke evaporator, kemudian uap (*steam*) pemanas diumpankan ke bagian "*shell side*" alat penukar panas dimana *steam* mengembun, panas pengembunan dipakai untuk penguapan cairan yang tersirkulasi dalam bagian "*tube side*" alat penukar panas. Limbah radioaktif yang teruapkan dalam bagian "*tube side*" dari alat penukar panas, uapnya dengan campuran limbah tersirkulasi masuk ke dalam Kolom Penenangan arah tengensial sehingga limbah cair yang pekat (konsentrat) akan terpisah dari uapnya, kemudian limbah cair yang pekat akan masuk ke tangki konsentrat, sedang uapnya menuju samping bawah dan masuk ke Kolom Pemisah dengan arah tangensial. Dalam kolom pemisah, uap

dicuci dengan air bebas mineral, uap yang lolos dari tangki pemisah diharapkan sudah tidak mengandung radionuklida dan didinginkan menjadi cairan destilat, sedang air cucian akan mengalir secara gravitasi ke tangki cairan aktif

Karakteristik limbah cair radioaktif yang dapat diolah dengan evaporator PTLR adalah kadar ekstrak kering 5 g/l, aktivitas spesifik $2 \times 10^{-2} \text{ Ci.m}^{-3}$, pH 7 atau netral dan tidak mengandung bahan organik. Konsentrat sebagai hasil dari proses evaporasi akan dikungkung dalam matriks semen atau shell beton 950 l, sedang destilat setelah memenuhi persyaratan bisa di buang ke lingkungan. Destilat yang dapat dilepas ke lingkungan mempunyai kadar garam kering $< 2,50 \times 10^{-4} \text{ gram.liter}^{-1}$ [3].

Kondisi unit evaporasi saat ini adalah proses dilaksanakan secara manual, pengaturan debit limbah dan *steam* pemanas diatur sedemikian rupa dengan memperhatikan level LR22010 dan LC 22010 pada kisaran 50 sampai 60 % agar tidak terjadi *carry over*. Prinsip sederhananya adalah mengatur agar limbah yang masuk sama dengan limbah yang teruapkan, sehingga proses akan berlangsung stabil.

METODOLOGI

BAHAN

Limbah radioaktif cair dari PRSG mengandung Co-60 dengan aktivitas $1,05 \cdot 10^{-4}$ Ci/m³ dan Cs-137 dengan aktivitas $3,96 \cdot 10^{-5}$ Ci/m³, pH : 5,7, ekstrak kering 5,8 gr/m³ dan beberapa logam terlarut seperti Fe, Cu, Cr dan lain lain. Bahan untuk *pre treatment* sebelum proses adalah asam nitrat (HNO₃) dan soda (NaOH)

Sebelum di evaporasi limbah cair ditampung dalam tangki penampungan limbah cair yaitu tangki R 2201A/B/C dan D, masing – masing kapasitasnya 50 m³. Kemudian diambil cuplikannya untuk dianalisis apakah limbah cair radioaktif sudah memenuhi persyaratan atau belum. Jika belum memenuhi syarat limbah cair dinetralisasi menggunakan asam/ soda, sedangkan jika telah memenuhi persyaratan limbah radioaktif cair siap dievaporasi.



Gambar 2. Panel Kontrol Evaporasi I 22001

Proses evaporasi dikendalikan dari panel Evaporasi I 22001 dapat dilihat pada Gambar 2,. Pada panel kontrol evaporasi diatas terdapat alur proses, tangki-tangki, pompa-pompa, tombol pompa dan *valve*, level indikator tangki, *counter* limbah cair masuk (FQ 22001), parameter suhu, tekanan, laju alir limbah dan *steam*, densitas, konduktivitas dan beberapa parameter yang lain.

Limbah cair dipompa menggunakan Pompa P 22004 atau pompa P 22005 ke alat penukar panas Evaporator E 22001 dengan cara pengaliran melalui pipa yang dilewatkan dalam tangki penampung untuk mengambil panas dari konsentrat R 22004. Pengaturan *steam* dan laju alir air limbah dikendalikan dari panel I 22001, termasuk pemantauan parameter ukur unit evaporasi dilihat dan di catat melalui penunjukan di panel evaporasi I 22001. Limbah cair masuk pada bagian "*tube side*" pada suhu 28°C, sedang *steam* yang bertekanan 4,5 - 5 bar masuk pada bagian "*shell side*". Dengan demikian limbah cair akan menjadi panas, mendidih dan mengalir ke kolom penenang R 22010 arah tangensial, sehingga uap limbah cair yang terkonsentrasi akan terpisah, konsentrat (pekatan) masuk ke tangki penampung konsentrat R 22004, sedangkan uapnya sebelum mengalir ke tangki pemisah D 22001 akan melewati "*buffle*" pada bagian puncak kolom yang memungkinkan

terjadi penahanan sebagian cairan yang terbawa oleh uap tersebut. Uap air selanjutnya akan mengalir ke bagian bawah kolom pemisah D 22001, didalam kolom pemisah uap air akan dicuci menggunakan air bebas mineral. Kontak muka antar fase terjadi pada 5 stage "*buble cap*" yang terakhir, sedang air bebas mineral masuk melalui kolom bagian atas tangki pemisah D 22001 akhirnya uap melewati sebuah "*mist eliminator*" pada bagian puncak kolom, disitu terjadi penahanan kandungan cairan yang masih terbawa dalam "*buble cap*" yang terakhir, sedang air bekas cucian mengalir secara gravitasi ke tangki penampung *effluent active* R 22002.

Uap yang lolos melalui "*mist eliminator*" akan masuk ke kondensor E 22002 pada bagian "*shell side*" sehingga uap akan mengembun karena pendingin yang mengalir melalui "*tube side*". Gas yang tidak terkondensi yang keluar dari *condenser* E 22002 akan menuju sirkuit offgas. Destilat yang terbentuk dari uap yang didinginkan pada *condenser* E 22002 bergerak menuju bagian "*tube side*" dari *cooler* E 22003, kemudian destilat yang terjadi bergerak menuju ke tangki destilat R 22006A atau R 22006B. Destilat yang dapat dilepas ke lingkungan mempunyai kadar garam kering < 2,50 gram.liter⁻¹. [4]

HASIL DAN PEMBAHASAN

Selama tahun 2016 evaporator bisa dioperasikan mulai akhir bulan Agustus 2016 karena pada awal tahun Boiler mengalami kerusakan. Sampai akhir Desember 2016 evaporator dioperasikan selama 20 kali operasi dengan volume 66 m³. Selain diproses secara evaporasi limbah cair dari RSG-GAS juga diolah secara penukar ion, pengoperasian secara penukar ion baru dalam tahap uji coba dan

pengembangan. Proses evaporasi disamping untuk mengolah limbah radioaktif cair juga untuk pengujian /pengecekan parameter ukur evaporasi, karena dengan dioperasikannya unit evaporasi akan diketahui unjuk kerja dari *level indicator*, temperatur, densitas, debit limbah dan juga debit *steam* serta parameter ukur yang lain. Pada operasi evaporasi limbah cair PRSG tersebut didapat data – data parameter ukur evaporasi seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data operasi unit evaporasi selama tahun 2016

No.	Parameter Ukur	Standar	Penunjukkan	Keterangan
1	Flowrate Recorder FR 22001 m ³ /h	0,8-1,5	0.8 - 1.05	Normal
2	Flowrate Recorder FR 62501 t/h	1,18	0.45 – 1.6	Normal
3	Temperature Recorder TR 62501 °C	105	102	Normal
4	Pressure Indicator PI 62501 bar	5	4,7 - 4,8	Normal
5	Flowrate Indicator FI 62201 L/h	100-250	191 - 200	Normal
6	Flowrate Indicator FI 62104 %	100	94 - 95	Normal
7	Temperature Indicator TI 22014 °C	30	27 - 29	Normal
8	Pressure Indicator PI 62104 kg/m ³	6	4 - 6	Normal
9	Level Recorder LR 22010 %	60	48 – 55	Normal
10	Densitas Recorder DR 22001 kg/m ³	960-1117	230 - 1020	Normal
11	Pressure Recorder PR 22012 mbar	60	50 - 60	Normal
12	Temperature Recorder TR 22001 °C	104	100 - 104	Normal

Dari Tabel 1 di atas bisa dilihat bahwa parameter ukur pada saat proses evaporasi masih dalam *range* yang diijinkan, hanya pada FR 62501 penunjukkan masih fluktuasi karena penunjukkan jarum tersebut sangat dipengaruhi transmitter FCZ 62501 karena *steam* pemanas transmitter tersebut keburu dingin terkondensasi dan menyumbat tekanan *steam* sehingga transmitter tidak bisa bekerja dengan baik. Hal ini membuat penunjukkan tidak valid, oleh karena itu operator harus sering mengontrol transmitter tersebut dan membuang cairan

kondensat *steam* dengan cara mengendorkan baut pada FCZ 62501 sehingga air kondensasi akan mengalir keluar sampai terlihat yang keluar adalah *steam* dan selanjutnya baut diikencangkan kembali[5][6].

PTLR memiliki 2 buah Boiler E6261A dan E6261B sebagai pembangkit uap (*steam*) untuk pemanas evaporator, tahun 2016 Boiler E6261A rusak dan yang bisa dioperasikan Boiler E6261B, proses evaporasi hanya dioperasikan harian karena tidak ada pengganti jika salah satu Boiler rusak di saat proses berlangsung. Pada

triwulan III dan IV tahun 2016, proses evaporasi bisa dilaksanakan 20 kali. Tabel proses

ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Tanggal proses Evaporasi

No	Tanggal Proses	Volume limbah cair terolah (m ³)
1	13 April 2016	0,5
2	9 Mei 2016	5
3	10 Mei 2016	4
4	11 Mei 2016	1,5
5	30 Mei 2016	5
6	30 Agustus 2016	2
7	31 Agustus 2016	4,5
8	1 September 2016	4
9	5 September 2016	3
10	6 September 2016	5
11	7 September 2016	4
12	8 September 2016	0,5
13	11 Oktober 2016	5
14	18 Oktober 2016	5
15	20 Oktober 2106	3,5
16	14 Nopember 2016	3
17	15 Nopember 2016	5
18	21 Nopember 2016	2
19	22 Nopember 2016	0,5
20	23 Nopember 2016	4
	Jumlah	66

Pada tanggal 8 September 2016 Evaporator dimatikan pukul 09.30 karena LI R22002 (penampung cairan effluent aktif) penuh, operasi dihentikan sampai effluent aktif di rilis ke PBT (Pantauan Buangan Terpadu). Kualitas destilat dan aktif effluent tidak terdeteksi sehingga bisa di lepas ke lingkungan.

Secara keseluruhan proses evaporasi selama tahun 2016 bisa mengolah limbah cair sebanyak 66 m³ (lihat Tabel 2) dan bisa dioperasikan secara nyaman tanpa ada gangguan proses yang berarti dan alarm kegagalan proses jarang terdengar. Proses selanjutnya akan dilaksanakan pada triwulan 1 tahun 2017.

KESIMPULAN

Selama tahun 2016, evaporator bisa dioperasikan untuk mengolah limbah radioaktif cair sebanyak 66 m³. Proses evaporasi dilaksanakan dengan nyaman tanpa fluktuasi yang berlebihan dengan mengatur besaran aliran umpan limbah cair dan besarnya penguapan mendekati seimbang. Parameter ukur proses evaporasi masih dalam range yang diijinkan berdasarkan catatan dalam log sheet proses evaporasi. Kestabilan pengoperasian/ pengiriman sistem penunjang dari BPFL (Bidang Pengembangan Fasilitas Limbah) juga sangat membantu dalam kegiatan proses evaporasi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kami sampaikan kepada teman-teman di Sub Bidang Pengelolaan Limbah Radioaktif atas kerja samanya dalam proses pengolahan limbah radioaktif cair secara evaporasi, demikian juga teman-teman dari BPFL atas pengoperasian seluruh sistem pendukung proses evaporasi, semoga kerja sama yang telah terjalin baik selama ini bisa dipertahankan dan ditingkatkan di masa yang akan datang.

DAFTAR PUSTAKA

1. UU No. 10 Tahun 1997 Tentang Ketenaganukliran
2. PP. No 61 Tahun 2013 Tentang Pengelolaan Limbah Radioaktif
3. Bahdir Johan DKK, Pengolahan Limbah Cair Melalui Proses Evaporasi P2PLR-BATAN
4. Imam Sasmito," Choaching Pengoperasian dan Perawatan Evaporasi
5. IPLR," PTLR, 9 April 2007 s/d 6 Juni 2007
6. Techatome," Liquid Waste Treatment by Evaporation", Operating manual; WSPG 220 UKT 9001 Paris, 19.06.1985.

UNJUK KERJA SISTEM AIR BEBAS MINERAL UNTUK PENGOLAHAN LIMBAH RADIOAKTIF

Jonner Sitompul, Sri Maryanto
Pusat Teknologi Limbah Radioaktif-BATAN
jonner@batan.go.id

ABSTRAK

UNJUK KERJA SISTEM AIR BEBAS MINERAL UNTUK PENGOLAHAN LIMBAH RADIOAKTIF. Pengoperasian sistem air bebas mineral dilakukan untuk mendukung proses pengolahan limbah radioaktif cair. Air bebas mineral dipergunakan sebagai media pencuci zat radioaktif dalam proses pengolahan limbah radioaktif cair pada sistem Evaporasi dan untuk kegiatan penelitian di laboratorium Preparasi dan Analisis Pusat Teknologi Limbah Radioaktif (PTLR). Keberhasilan pengolahan limbah radioaktif cair dipengaruhi kualitas dan mutu air bebas mineral. Untuk menjaga dan memastikan kualitas air bebas mineral, diperlukan unjuk kerja sistem air bebas mineral yang baik dan prima, sehingga dilakukan pengoperasian secara berkala atau pemanasan, perawatan dan perbaikan sesuai kebutuhan. Pengoperasian pemanasan dilakukan terhadap pompa booster, pompa sirkulasi dan pompa distribusi. Perbaikan/revitalisasi sistem air bebas mineral dilakukan pada tabung Anion dan tabung Kation. Dari data hasil pengukuran air bebas mineral yang dihasilkan sistem peralatan air bebas mineral diperoleh kualitas konduktivitas rata-rata lebih kecil dari $2\mu\text{Sm/cm}$, sehingga kebutuhan laboratorium Preparasi dan Analisis dan sistem Evaporasi dalam melakukan pengolahan limbah radioaktif di PTLR terpenuhi dengan baik dan aman.

Kata Kunci : air bebas mineral, pengolahan limbah radioaktif

ABSTRACT

PERFORMANCE OF WATER DEMINERALIZED WATER SYSTEM FOR RADIOACTIVE WASTE PROCESSING. The operation of a demineralized water system is carried out to support the process of liquid radioactive waste treatment. Demineralized waters used as a radioactive washer medium in the processing of liquid radioactive waste in Evaporation system and for research activities in laboratory of Preparation and Analysis of Radioactive Waste Technology Center (RWTC). The success of liquid radioactive waste treatment is influenced by the quality and quality of mineral free water. To maintain and ensure the quality of mineral-free water, it is necessary to perform good and excellent demineralized water system performance, so that the operation is done periodically or heating, maintenance and repair as needed. Heating operation is carried out on booster pumps, circulation pumps and distribution pumps. Improvement / revitalization of demineralized water system is done on Anion and Cation tube. From the result of measurement of demineralized water produced by demineralized water equipment system, the average conductivity quality is smaller than $2\mu\text{Sm/cm}$, so the need of laboratory of Preparation and Analysis and Evaporation system in conducting the processing of radioactive waste in PTLR is fulfilled well and safe used to meet the needs of the Evaporation system in processing radioactive waste in PTLR.

Keywords: demineralized water, radioactive waste treatment.

PENDAHULUAN

Air bebas mineral adalah air yang tidak mengandung atau sangat sedikit mineral-mineral atau garam-garam sehingga daya (kemampuan) untuk menghantar listrik sangat terbatas. Tingkat kebebasan mineral ditunjukkan oleh derajat konduktivitas atau daya hantar listrik air tersebut, yang biasanya diukur dengan Siemens atau Ohm. Sebagai contoh air bebas mineral yang digunakan untuk berbagai keperluan pada umumnya harus mempunyai konduktivitas $> 500.000\text{ ohm}$ atau daya hantar listrik $< 2\mu\text{Sm/cm}$

Unit pemurnian air yang ada di PTLR bertujuan menghasilkan air bebas mineral. Air tersebut digunakan untuk mendukung proses pengolahan limbah radioaktif cair secara evaporasi dan keperluan penelitian di laboratorium Preparasi dan Analisis Bidang

Pengelolaan Limbah (BPL) dan bidang lain di PTLR.

Kegiatan pengoperasian pengolahan limbah radioaktif cair berkurang karena berkurangnya limbah cair dari Pusat Teknologi Reaktor Riset (PTRR) dan dari instalasi-instalasi BATAN lainnya maupun dari luar BATAN. Akibatnya penggunaan air bebas mineralpun berkurang. Pemakaian air bebas mineral untuk proses pengolahan tersebut sampai akhir 2016 hanya 740,04 gallon.^[1]

Pengoperasian peralatan sistem air bebas mineral dilakukan pada kegiatan perawatan (regenerasi) dan pemanasan rutin minggu, sehingga kualitas air demin yang disyaratkan untuk pengolahan limbah cair dapat terpenuhi dengan konduktivitas di bawah $2\mu\text{S/cm}$.

TATA KERJA

Bahan, peralatan dan pelaksanaan kegiatan.

Bahan Air baku dari PAM Puspipstek dengan ph 6 – 7, NaOH (soda api 98 % flake) dan HCl 32 %^[2]. Sistem air bebas mineral dioperasikan dengan menggunakan salah satu pompa distribusi P 62201 A atau P 62201 B yang secara otomatis akan beroperasi bergantian yang diatur *selector switch* pada posisi *auto* jika satunya beroperasi. Konduktifitas air baku PDAM Puspipstek dan air bebas mineral hasil produksi Filter Anion dan Kation di ukur dengan Conductivitymeter.

1. Regenerasi Resin Anion dan Resin kation^[2]

- Pengecekan air baku pada tangki R 62201, R 62202 dan R 62203
- Proses regenerasi :

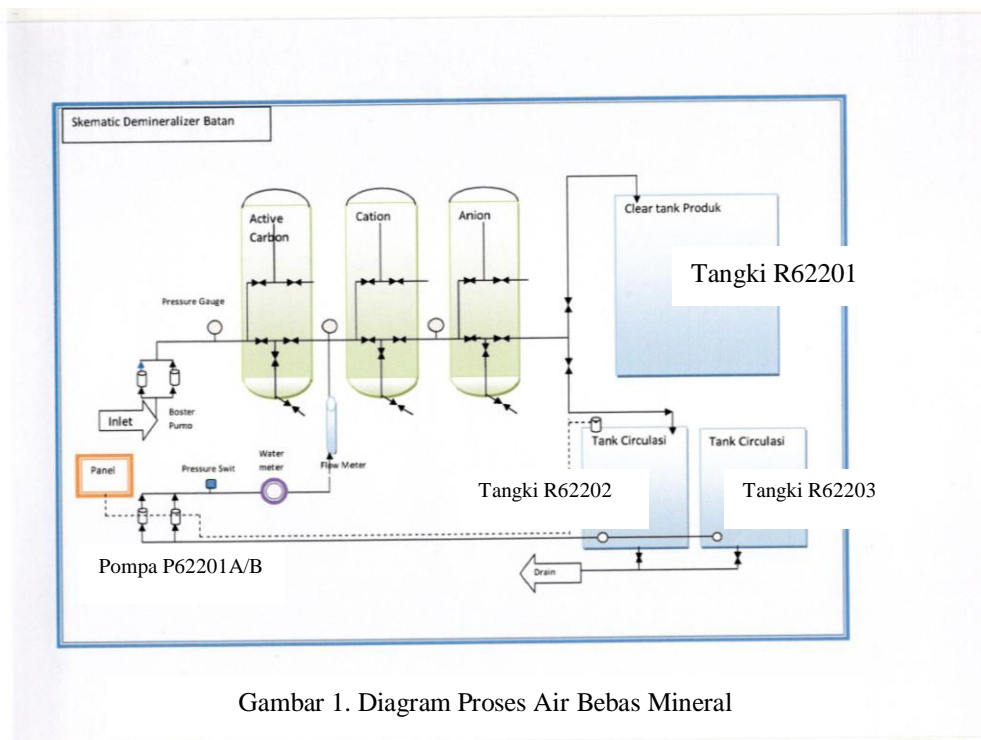
* Pada tangki Resin Kation : HCL 32 % sebanyak 9 liter dicampur air hingga menjadi

\pm 30 liter dalam wadah *chemical* HCL. Pompa P 62204 dihidupkan sampai larutan

chemical habis. Supaya sisa larutan *chemical* pada saluran pipa dan wadah hilang valve V7 & V9 dibuka \pm 5 – 10 menit. Setelah benar-benar bersih valve V 7 & V9 ditutup.

* Pada tangki Resin Anion : NaOH 48% sebanyak 10 liter dicampur air hingga menjadi

\pm 100 liter dalam wadah *chemical* NaOH. Pompa P 62204 dihidupkan sampai larutan *chemical* habis. Supaya sisa larutan *chemical* pada saluran pipa dan wadah hilang, valve V16 & V42 dibuka \pm 5 – 10 menit. Setelah benar-benar bersih valve V 16 & V42 ditutup kembali.



Gambar 1. Diagram Proses Air Bebas Mineral

2. Pengoperasian

Setelah proses regenerasi selesai, air demin yang telah memenuhi syarat lalu disalurkan ke tangki penyimpanan R 62203 (kapasitas 4 m³) dengan membuka valve V30 dan V44. Pengoperasian pompa distribusi P 62201 A atau P 62201 B diposisikan secara otomatis, sehingga berfungsi bergantian dan *stand-by* sesuai pengaturan *selector switch* yang ditentukan. Air bebas mineral dikirimkan ke sistem Evaporator dengan menggunakan P 62201 A atau P 62201 B untuk keperluan proses pengolahan limbah radioaktif

cair dan kegiatan penelitian di laboratorium Preparasi dan Analisis dengan membuka valve V31.

3. Perawatan

Perawatan dilakukan dengan melakukan pemeriksaan beberapa bagian peralatan Sistem Air Bebas Mineral, yaitu :

- pembersihan tangki R 62202, R 62203, dan R 62204.
- pemeriksaan valve-valve dan saluran sirkulasi minimal.

- pemeriksaan pompa-pompa sirkulasi dan distribusi (*clearance* kelurusan poros motor terhadap poros pompa, *bearing*, temperatur dan *megger*).
- pemeriksaan dan pembersihan panel kelistrikan dari kotoran 3 bulan sekali
- pemeriksaan kualitas air minimal.

4. Pemanasan

Telah dilakukan pemanasan peralatan sistem asir bebas mineral, diantaranya pompa Booster P 62202 A dan P 62202 B, pompa Distribusi P 62201 A dan P 62201 B, pompa Sirkulasi P 62203 dan pompa Regenerasi P 62204 selama 3 jam per minggu dalam tiap bulannya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada tahun kegiatan 2016 Sistem Air Bebas Mineral dilakukan proses regenerasi, pengoperasian sistem dan operasi pemanasan peralatan. Untuk memenuhi kebutuhan air bebas

mineral pada pengolahan limbah cair di unit evaporasi dilakukan pengoperasian sistem air bebas mineral selama 225 jam yang terdiri dari pengolahan limbah cair 65 jam dan pemanasan rutin 160 jam. Pemanasan dilakukan rutin setiap mingguan 0,5 jam karena pengoperasian sistem evaporasi hanya secara berkala atau tidak setiap hari sesuai kebutuhan dan kondisi jumlah limbah radioaktif cair.

1. Pemakaian Bahan Kimia ^[3]

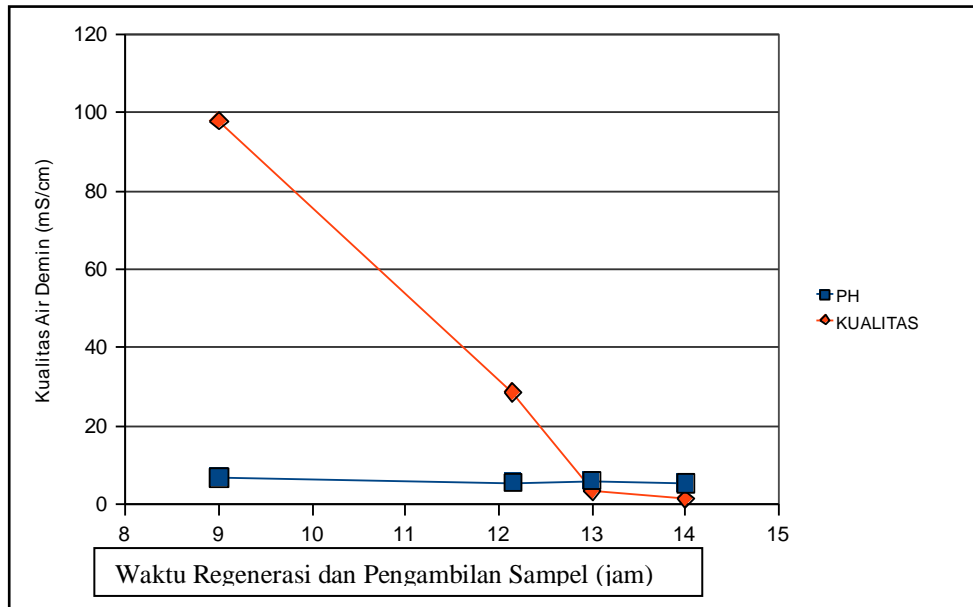
Untuk melakukan regenerasi diperlukan bahan kimia HCL dan NaOH. Rata-rata kebutuhan adalah HCL 9 liter untuk meregenerasi resin penukar kation dan meregenerasi resin penukar kation NaOH 10 liter. Pengamatan dilakukan dengan cara melihat jumlah kebutuhan kedua bahan kimia tersebut untuk setiap regenerasi.

Tabel 1.Data Air Baku Sebelum Regenerasi.

No	Tanggal	KUALITAS AIR BAKU				KETERANGAN
		PH	WARNA	BAU	KONDUKTIVITAS	
1	05 -01 - 2016	6,6	Tidak berwarna	Tidak berbau	87 μ S/cm	Tidak memenuhi syarat < 2 μ S/cm
2.	06 -01 - 2016	6,6	Tidak berwarna	Tidak berbau	90 μ S/cm	Tidak memenuhi syarat < 2 μ S/cm
3.	07 -01 - 2016	6,5	Tidak berwarna	Tidak berbau	92 μ S/cm	Tidak memenuhi syarat < 2 μ S/cm
4.	19 -01 - 2016	6,7	Tidak berwarna	Tidak berbau	90 μ S/cm	Tidak memenuhi syarat < 2 μ S/cm
5.	20 -01 - 2016	6,5	Tidak berwarna	Tidak berbau	92 μ S/cm	Tidak memenuhi syarat < 2 μ S/cm
6.	21 -01 - 2016	6,4	Tidak berwarna	Tidak berbau	90 μ S/cm	Tidak memenuhi syarat < 2 μ S/cm

Tabel 2.Data Kualitas Air Bebas Mineral Setelah Regenerasi

No	J A M	KUALITAS AIR HASIL REGENERASI				KETERANGAN
		PH	WARNA	BAU	KONDUKTIVITAS	
1.	09.00	6,50	Tidak berwarna	Tidak berbau	98,0 μ S/cm	Tidak memenuhi syarat > 2 μ S/cm
2.	09.30	5,50	Tidak berwarna	Tidak berbau	85,0 μ S/cm	Tidak memenuhi syarat > 2 μ S/cm
3.	10.00	5,25	Tidak berwarna	Tidak berbau	65,0 μ S/cm	Tidak memenuhi syarat > 2 μ S/cm
4.	11.00	5,05	Tidak berwarna	Tidak berbau	45,0 μ S/cm	Tidak memenuhi syarat > 2 μ S/cm
5.	12.00	5,05	Tidak berwarna	Tidak berbau	25,0 μ S/cm	Tidak memenuhi syarat > 2 μ S/cm
6.	13.00	5,00	Tidak berwarna	Tidak berbau	1,8 μ S/cm	Memenuhi syarat < 2 μ S/cm
7.	14.00	5,00	Tidak berwarna	Tidak berbau	1,5 μ S/cm	Memenuhi syarat < 2 μ S/cm



Gambar 2. Hubungan Waktu Regenerasi dengan Kwaliatas Air Bebas Mineral^[4].

2. Regenerasi Resin Anion dan Resin kation ^[3]

Pada laporan kegiatan tahun 2016, telah dilakukan 1 (satu) kali regenerasi dengan hasil dapat dilihat pada Tabel 1 dan Tabel 2 pada saat sampel diambil pada tanggal 07 Februari 2016 dan pemeriksaan sampel 09 Februari 2016.

Dalam pengamatan selama 6 hari berturut-turut, nilai konduktifitas air baku yang bersumber dari PDAM Puspipetek berkisar 87 µS/cm sampai 92 µS/cm (dapat dilihat pada Tabel 1.). Nilai tersebut sangat jauh dari nilai konduktifitas maksimal yang dipersyaratkan sistem Evaporasi Instalasi Pengolahan Limbah Radioaktif yaitu 2µS/cm^[5]. Setelah dilakukan Regenerasi selama 5 jam nilai konduktifitas Air Bebas Mineral menjadi sangat bagus pada nilai 1,8µS/cm – 1,4µS/cm. Hal ini dapat terjadi karena resin penukar ion di dalam tabung Anion dan Kation Sistem Air Bebas Mineral terbukti berfungsi dengan baik untuk

menyerap mineral-mineral yang ada pada kandungan air baku yang bersumber dari PDAM Puspipetek yang sebelumnya konduktifitas 87µS/cm sampai 92µS/cm. Nilai konduktifitas hasil regenerasi dapat dilihat pada Tabel 2.

3. Pengoperasian

Pada 2016 pengoperasian sistem air bebas mineral dioperasikan selama 65jam dengan total yang dihasilkan sebanyak 3.435,9 gallon untuk kebutuhan sistem Evaporasi. Dan untuk kegiatan penelitian di laboratorium Preparasi dan Analisis sebanyak 270gallon dioperasikan selama 1,5jam. Jumlah Air Bebas yang dihasilkan selama dioperasikan pada tahun 2016 dapat dilihat pada tabel Tabel 3. sesuai dengan Pengoperasian pengolahan limbah radioaktif cair pada sistem Evaporasi.

Tabel 3. Jumlah Pemakaian Air Bebas Mineral.

Kebutuhan	Debit Aliran (gpm)	Waktu Operasi (jam)	Pemakaian Air Bebas Mineral (gallon)
Kolom Separator	0.881	65	65 x 60 x 0.881 = 3.435,9
Anti Foaming	0.013	-	-
Laboratorium	3.0	1,5	1,5 x 60 x 3,0 = 270

KESIMPULAN

1. Unjuk Kerja Sistem Air Bebas Mineral selama tahun 2016 dalam melayani kebutuhan IPLR masih dapat berjalan dengan normal, karena kualitas air masih sesuai dengan spesifikasi yang disyaratkan $< 2 \mu\text{S/cm}$.
2. Pengoperasian sistem air bebas mineral dioperasikan berdasarkan permintaan, baik untuk proses pengolahan limbah cair maupun keperluan di laboratorium Preparasi dan Analisis Bidang Pengelolaan Limbah.
3. Kegiatan Regenerasi sistem air bebas mineral dapat dilaksanakan dengan baik sesuai dengan kebutuhan.

SARAN

Ketika melakukan regenerasi pada tangki Anion, Kation diperlukan bahan kimia NBS (Natrium Bisulfat/ NaHSO_3 , HCL, NaOH sehingga diperlukan tempat/ruangan khusus bahan kimia untuk menghindari terjadinya korosif terhadap peralatan-peralatan dan tangki penampung air demin.

DAFTAR PUSTAKA

1. TEDDY SUMANTRI, "Sistem Air Bebas Mineral", *Diktat Praktikum Sarana Penunjang*, 1988.
2. Anonim, "System Not Demineralized Water" PTPLR, 1985.
3. SAFILT. "Operating Manual Demin Water System" PTPLR, 1985.
4. Anonim, "Demineralized Water System", *Calculation Sheet 15*, 1985.
5. PUSTANDYO W, DYAH HERLINA, TH RINA M, "Analisis Keandalan Resin Penukar Ion Terhadap Kualitas Air Pendingin Primer", 1994.

