

PROSIDING SEMINAR NASIONAL TEKNOLOGI PENGELOLAAN LIMBAH XIV

TEMA SEMINAR

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



05 Oktober 2016

Gedung IASTH Universitas Indonesia
Salemba – Jakarta

Penyelenggara



UNIVERSITAS INDONESIA

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

Diterbitkan Desember 2016

KATA PENGANTAR

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

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

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

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

Jakarta, Desember 2016

Kepala
Pusat Teknologi Limbah Radioaktif
Badan Tenaga Nuklir Nasional

Ir. Suryantoro, MT

SUSUNAN TIM EDITOR

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

SUSUNAN PANITIA

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

DAFTAR ISI

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

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

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

KARAKTERISTIK LIMBAH RADIOAKTIF TINGKAT RENDAH DAN SEDANG DARI REAKTOR DAYA EKSPERIMENTAL HTR-10

Kuat Heriyanto

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

ABSTRAK

KARAKTERISTIK LIMBAH RADIOAKTIF TINGKAT RENDAH DAN SEDANG DARI REAKTOR DAYA EKSPERIMENTAL HTR-10. Telah dilakukan kajian tentang karakteristik limbah radioaktif tingkat rendah dan sedang yang berasal dari reaktor daya eksperimental tipe HTR-10. Karakteristik limbah perlu diketahui untuk menentukan metode pengolahannya. Kajian dilakukan dengan mempelajari sistem operasi reaktor dari pustaka dan perhitungan. Diperoleh hasil karakteristik limbah radioaktif padat tingkat rendah antara lain: debu, karbonaktif, filterbekas dan limbah padat terkontaminasi dengan radionuklida I-131, I-132, I-133, I-134, I-135, C-14, Kr-85, Kr-87, Kr-88, Xe-133, Xe-135, Cs-137 dan Sr-90, sedangkan yang berupa cair berasal dari sistem purifikasi dan laundry serta kegiatan dekontaminasi dengan jenis radionuklida antara lain: H-3, C-14, Cs-137, Sr-90. Pengoperasian reaktor tipe HTR-10, selain menimbulkan limbah Bahan Bakar Nuklir Bekas juga menimbulkan limbah cair dan padat. Diharapkan tulisan ini dapat dijadikan salah satu acuan pengelolaan limbah radioaktif rendah dan sedang reaktor HTR-10.

Kata kunci: Reaktor HTR, limbah radioaktif dan karakteristik

ABSTRACT

CHARACTERISTICS OF LOW-INTERMEDIATE LEVEL RADIOACTIVE WASTE OF POWER EXPERIMENTAL REACTOR HTR-10. A research on the characteristics of low-level radioactive waste and being experimental power reactor type HTR-10. Characteristics of waste need to know to determine the treatment methods. The research method to study the reactor operating system of the library and calculations. The characteristics result of low-level solid radioactive wastes is obtained, include: dust, activated carbon, filter former and solid waste contaminated with radionuclides I-131, I-132, I-133, I-134, I-135, C-14, Kr-85, Kr-87, Kr-88, Xe-133, Xe-135, Cs-137 and Sr-90, while in the form of liquid coming from purification system and laundry as well as with the type of radionuclide decontamination include: H-3, C-14, Cs-137, Sr-90. Operation type reactor HTR-10, in addition to causing the waste also poses Used Fuel liquid and solid wastes. It is hoped this article can be used as reference for the management of radioactive waste of low and medium reactor HTR-10.

Keywords: reactor, radioactive waste and characteristics

PENDAHULUAN

Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2015 tentang Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional (RPJMN) tahun 2015-2019 disebutkan bahwa di bidang energi akan dimulai pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN)[1]. Pepres tersebut menjadi dasar penyusunan Renstra BATAN 2015-2019 yang memprioritaskan pembangunan Reaktor Daya Eksperimen (RDE)[2]. RDE yang akan dibangun merupakan reaktor bertemperatur tinggi dengan pendingin gas dengan daya thermal 10MW (*High Temperature Reactor 10 MW thermal, HTR-10*)[3].

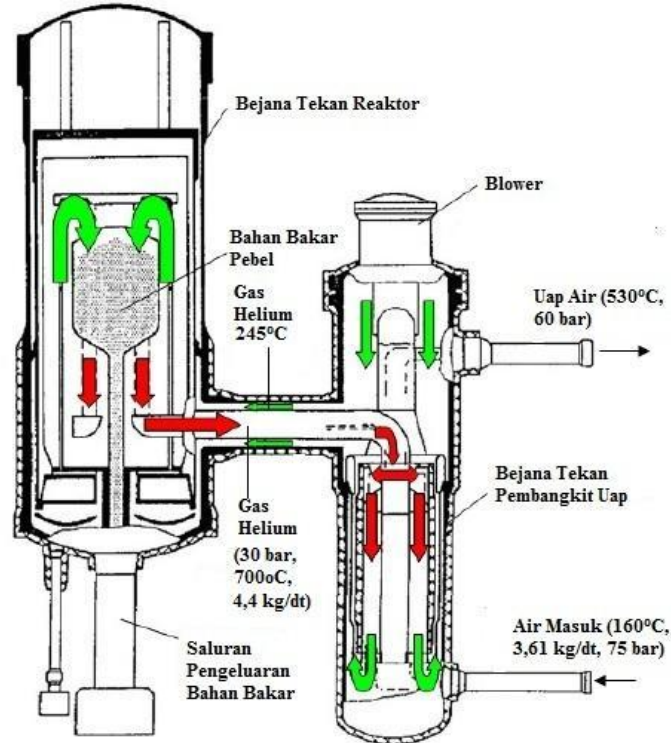
Reaktor Daya Eksperimental (RDE) tipe HTR-10 adalah reaktor dengan daya thermal 10 MW berpendingin helium (He) dengan tekanan 3 atm, berbahan bakar kernel UO₂ pengkayaan uranium 17% berat yang berlapis keramik

dengan moderator grafit. Gas helium yang digunakan sebagai pendingin mengandung pengotor yang terdiri dari CH₄ (≤ 1 ppm), uap H₂O (≤ 0.2 ppm), H₂ (≤ 3 ppm), CO (≤ 3 ppm), dan N₂ (≤ 1 ppm). Gambar 1 menunjukkan diagram pengaliran gas helium dari reaktor ke *steam-turbin* untuk pembangkitan steam, suhu gas helium masuk reaktor adalah 245°C dan keluar 700°C. Gas helium yang telah mengambil panas dari reaktor kemudian dialirkan ke *steam-turbin* untuk pembangkitan *steam*[4].

Pengelolaan limbah radioaktif merupakan bagian penting dari pengoperasian reaktor nuklir, oleh karena itu perlu dilakukan karakterisasi limbah radioaktif yang ditimbulkan dari pengoperasian RDE tipe HTR-10. Karakterisasi meliputi jenis unsur radioaktif dalam limbah, jenis dan jumlah limbah. Karakteristik limbah akan mempermudah dalam penanganan pengelolaan selanjutnya, sehingga dapat memberikan jaminan keselamatan bagi

pekerja dan masyarakat. Makalah ini akan menjelaskan karakteristik limbah padat dan cair yang ditimbulkan dari pengoperasian HTR-10. Diharapkan makalah ini dapat dijadikan salah satu acuan dalam pengelolaan limbah radioaktif cair dan padat yang ditimbulkan reaktor HTR-10. Unsur radioaktif didalam limbah terdiri dari unsur radioaktif hasil reaksi pembelahan dan elemen transuranium hasil aktivasi uranium dalam bahan bakar nuklir, unsur radioaktif yang

lain adalah tritium hasil aktivasi boron, litium, pengotor yang berupa CH_4 , uap H_2O , H_2 dalam pendingin helium. Tritium juga ditimbulkan dari hasil aktivasi He-3 yang terdapat didalam pendingin helium. Tritium juga dihasilkan dari hasil aktivasi pengotor boron dan litium dalam matriks bahan bakar HTR-10. Unsur radioaktif yang lain adalah C-14 hasil aktivasi pengotor pendingin helium yang berupa CO , dan N_2 [4].



Gambar 1. Skema reaktor HTR-10 dengan pendingin primer gas helium yang panasnya untuk pembangkitan uap air pada *steam-turbin* [5,6].

Sistem Purifikasi

Pada kondisi normal, 5% laju alir gas helium ($13 \text{ m}^3/\text{jam}$) dari sistem pendingin primer dimasukkan kedalam sistem purifikasi, selanjutnya gas helium hasil purifikasi dimasukkan kembali kedalam sistem pendingin primer. Gas helium tersebut pada awalnya melewati filter penghilang partikel debu, dan kemudian dilewatkan ke pemanas. Gas helium panas selanjutnya dilewatkan ke *converter* katalitis CuO untuk mengoksidasi CO menjadi CO_2 dan H_2 menjadi H_2O dengan penambahan gas O_2 . Gas helium keluar dari *converter* yang masih bersuhu tinggi selanjutnya dilewatkan ke pemanas untuk pemanasan gas helium hasil purifikasi sebelum dimasukkan kembali ke sistem pendingin primer. Gas helium yang keluar dari pemanas kemudian di lewatkan ke pendingin, gas tersebut didinginkan sampai kandungan uap airnya mengembun, selanjutnya

embunan uap air dipisahkan pada separator air. Gas helium yang keluar dari separator air kemudian dilewatkan ke *molecular sieve* untuk pengambilan partikel yang berukuran kecil. Gas helium yang keluar dari *molecular sieve* yang masih panas selanjutnya digunakan sebagai fluida pemanas pada pemanas untuk pemanasan gas helium hasil purifikasi. Gas tersebut selanjutnya dilewatkan ke kondensor yang berpendingin nitrogen cair untuk pengembunan uap airnya, kemudian gas helium dilewatkan ke filter karbon aktif untuk pengikatan gas I-131 , C-14 , Xe-133 , dan Kr-85 . Gas helium yang keluar dari filter merupakan gas helium hasil purifikasi.

Pada kondisi kegagalan operasi, kegiatan perawatan, atau regenerasi sistem, gas helium pada awalnya akan melewati berturut-turut filter, pendingin, dan separator air. Gas helium yang keluar dari separator air selanjutnya diolah seperti rangkaian alat proses pada Unit Pertama yang juga tersedia pada Unit Kedua.

Pada kegiatan purifikasi gas helium dapat menimbulkan limbah radioaktif padat berupa filter penangkap debu dan karbon aktif yang terkontaminasi oleh I-131, I-132, I-133, I-134, I-135, C-14, Kr-85, Kr-87, Kr-88, Xe-133, dan Xe-135. Kegiatan purifikasi tersebut juga menimbulkan limbah radioaktif cair berupa air yang terkontaminasi oleh H-3, C-14, Cs-137, dan Sr-90[7,8,9].

Sistem Ventilation and Air Conditioning(VAC) dan gas buang (Off Gas)

Gedung fasilitas RDE dilengkapi dengan sistem *Ventilation and Air Conditioning* (VAC) dan gas buang (*Off Gas*). Sistem VAC mempunyai lingkup suplai udara dan pengaturan tekanan negatif ruangan serta ekstraksi udara dari ruangan yang selanjutnya udara tersebut disaring dengan pre-filter jenis *glass fiber paper* untuk filtrasi pendahuluan dan kemudian disaring berturut-turut dengan filter carbon aktif dan *High Efficiency Particulate Air* (HEPA) filter. Sistem *Off Gas* mempunyai fungsi penarikan udara dari peralatan yang diindikasikan terdapat kontaminan kimia dan radioaktif yang kemudian udara tersebut diproses melalui dehumidifikasi, absorpsi, dan filtrasi, selanjutnya udara tersebut digabung dengan udara dari sistem VAC dan dilepas melalui cerobong. Dari sistem VAC dan *Off Gas* ditimbulkan limbah radioaktif padat yang berupa pre-filter, karbon aktif, dan HEPA filter, dan limbah radioaktif cair [7, 10, 11].

Potensi yang akan menjadi limbah padat dari pengoperasian reaktor RDE tipe HTR-10 antara lain debu grafit dari purifikasi gas helium yang tertangkap pada filter F-04 jenis *bagfilter*, pre-filter, filter karbon aktif bekas, padatan terkontaminasi dari kegiatan perawatan yang terdiri dari sarung tangan, kertas, kain dan pakaian kerja.

Sedangkan yang berpotensi menjadi limbah cair dari pengoperasian reaktor RDE tipe HTR-10 antara lain adalah: limbah cair dari sistem purifikasi gas helium, pencucian pakaian kerja (*laundry*), cairan kegiatan dekontaminasi, *shower* dan air pencucian. Limbah radioaktif cair dari sistem purifikasi gas helium mengandung H-3, Cs-137, Sr-90, dll, pada tingkat aktivitas rendah dan sedang diperkirakan sebanyak 2,5m³/th. Limbah radioaktif cair dari kegiatan *laundry*, dekontaminasi, *shower*, sistem VAC, dll, mempunyai tingkat aktivitas rendah diperkirakan sebanyak 15m³/th.

Pada Tabel 1 dan Tabel 2 terlihat bahwa suhu gas helium masuk dan keluar reaktor berturut-turut adalah 245 °C dan 700 °C [5,6]. Laju alir massa gas helium adalah 4,4 kg/dt. Pada Tabel 2 diberikan data desain reaktor HTR-10, terlihat bahwa dalam pengoperasiannya temperatur air masuk dan keluar pada pembangkit uap mempunyai harga 160 dan 530°C.

Tabel 1. Data Parameter Disain Utama Dari Reaktor HTR-10 [5,6]

Parameter desain yang penting	Unit	Jumlah
Energi termal	MW	10
Diameter teras reaktor	Cm	180
Tinggi teras rata-rata	Cm	200
Tekanan helium primer	Bar	30
Temperatur rata-rata helium pada lubang masuk/keluar reaktor	°C	245 /700
Kecepatan alir massa helium pada energi penuh	kg dt ⁻¹	4,4
Densitas energi rata-rata teras	MW m ⁻³	2
Faktor energi puncak		1,54
Jumlah batang kendali pada sisi reflector		10
Jumlah absorber bola pada sisi reflector		7
Bahan bakar nuklir	<i>Low Enrichment Uranium</i>	UO ₂ (LEU)
Jumlah logam berat dalam elemen bakar	g	5
Pengkayaan elemen bakar segar	%	17
Jumlah elemen bakar dalam teras		27.000
Manajemen bahan bakar	<i>Multi-pass</i>	<i>Continuous Re-Loading (MEDUL)</i>
Waktu rata-rata tinggal satu elemen bakar dalam teras	EFPD	1080

Tingkat energi maksimal elemen bakar	kW	0.57
Temperatur maksimal bahan bakar (operasi normal)	°C	919
Target <i>Burn up</i>	MWd tHM ⁻¹	80.000
Fluk termal maksimal dalam teras (E>1.86 eV)	n cm ⁻² dt ⁻¹	3,43×10 ¹³
Fluk cepat maksimal dalam teras (E>1 MeV)	n cm ⁻² dt ⁻¹	2,77×10 ¹³

Dari Tabel 2 ditunjukkan bahwa laju alir gas helium berharga 4,4 kg/dtk [5], densitas gas helium adalah 0,1769 g/L [4], maka laju alir volumetric gas helium adalah 25.000 L/dtk. Pada system purifikasi gas helium, laju alir gas helium adalah 5% dari laju alir utamanya. Kadar debu grafit dalam gas helium sebesar 0,125 mg/L, maka laju pembentukan debu adalah 25.000 L/dtk x 0,125mg/L x 5% atau sebesar 3125 kg/jam x 5%. Jumlah limbah padat debu grafit pertahun 156,25 kg/th (dibulatkan 160 kg/th). Filter F-04 jenis *bag filter* digunakan untuk menangkap debu grafit dalam kegiatan purifikasi gas helium. Jumlah filter bekas diperkirakan sebanyak 10m³/th, dan jumlah HEPA filter diperkirakan 0,2m³/th.

Umur ekonomis HEPA filter adalah 2-3th [13]. Limbah padat filter karbonaktif bekas adalah filter yang telah digunakan untuk penangkapan gas iodine, karbon, kripton, dan xenon. Total aktivitas I-131 yang dihasilkan pada akhir siklus reaktor

RDE tipe HTR-10 adalah 10¹⁶ Bq atau 2,7x10⁵ Ci, aktivitas spesifik I-131 adalah 1,2x10⁵ Ci/g maka jumlah I-131 adalah sebesar 2,25g. Karbon aktif mempunyai kapasitas penyerapan sebesar 1gI-131/kg karbon aktif [4, 12].

Jumlah karbon aktif yang diperlukan untuk menangkap 2,25 g I-131 adalah sebesar 2,25 kg. Bila efisiensi filtrasi dengan karbon aktif berharga 45% maka jumlah limbah karbon aktif pertahun adalah 2,25/0.45 atau sebesar 5 kg/th. Limbah padat terkontaminasi zat radioaktif dari kegiatan *maintenance* mempunyai jumlah 0,28 m³/tahun, yang merupakan limbah LRTR jenis tingkat sangat rendah. Dari system VAC-Off Gas ditimbulkan limbah radioaktif padat prefilter jenis *glass fiber paper*, karbon aktif, dan filter HEPA masing- masing sebanyak 10 m³/th, 5kg/th, dan 0,2m³/th

Tabel 2.Data disain reaktor HTR-10[6].

Bejana Tekan	
Tekanan Disain	40 bar
Tekanan Operasi	30 bar
Tinggi bejana tekan reaktor	10.8 m
Diameter dalam bejana tekan reaktor	4.5 m
Tinggi bejana tekan pembangkit uap	12.35 m
Diameter dalam bejana tekan pembangkit uap	1.5 m
Diameter dalam bejana tekan saluran gas	700 mm
Material	
Bejana tekan	20 MnMoNi 5 5
<i>Nozzle</i> utama uap air	X 20 CrMoV 121/10 CrMo 9 10
<i>Nozzle</i> air umpan	20 MnMoNi 5 5
Pembangkit uap	
Kapasitas transfer panas	10.5 MJ/dt
Laju alir massa pendingin primer	4.4 kg/dt
Temperatur masuk pendingin primer	700 °C
Temperatur keluar pendingin primer	245 °C
Tekanan masuk pendingin primer	30 bar
Temperatur air umpan	160 °C
Temperatur uap air	530 °C
Tekanan uap pada keluaran pembangkit uap	60 bar
Diameter luar <i>tube</i> dalam <i>tube bundle</i>	23 mm

Material	
Tube untuk pembangkit uap	X 10NiCrAlTi 32 20
Tube untuk air umpan	X 10NiCrAlTi 32 20
Tube untuk uap air	X 10NiCrAlTi 32 20
Blower gas primer	
Head statis total	1.5 bar
Saluran gas panas	
Diameter dalam pipa gas	225 mm
Diameter luar pipa penahan	500 mm
Tebal isolator fiber	100 mm
Material	
Pipa gas	X 10NiCrAlTi 32 20
Isolator	Material fiber Al ₂ O ₃

METODOLOGI

Karakteristik diperoleh melalui kajian komprehensif tentang potensi limbah yang ditimbulkan dari pengoperasian RDE tipe HTR-10. Pengumpulan data dan informasi dilakukan dengan mempelajari beberapa literatur yang ada tentang sistem operasi reaktor HTR-10.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Limbah Radioaktif Padat

Tabel 3 Menampilkan limbah padat yang ditimbulkan reaktor HTR-10. Pengoperasian reaktor HTR-10 menimbulkan limbah radioaktif padat, antara lain: berupa debu moderator grafit, karbon aktif bekas, filter bekas (*bag filter*), HEPA filter, drum filter, pebel moderator grafit, grafit (*carbon brick*), pre-filter, serta padatan terkontaminasi. Debu moderator grafit berasal dari purifikasi gas helium yang tertangkap pada filter. Sedangkan padatan terkontaminasi ditimbulkan dari kegiatan perawatan seperti sarung tangan, kertas, kain dan pakaian. Berdasarkan spesifikasi teknis (Tabel2) laju alir gas helium berharga 4,4 kg/dtk [5], densitas gas helium adalah 0,1769 g/L [13], maka laju alir volumetric gas helium adalah 25.000 L/dtk. Sistem purifikasi gas helium mempunyai laju alir 5% dari laju alir utamanya. Kadar debu grafit dalam gas helium sebesar 0,125 mg/L, maka diperoleh laju pembentukan debu adalah 25.000 L/dtk x 0,125 mg/L x 5% atau sebesar 3125 kg/jam x 5%. Jumlah limbah padat debu grafit pertahun 156,25 kg/th (dibulatkan 160 kg/th).

Filter F-04 jenis *bag filter* digunakan untuk menangkap debu grafit dalam kegiatan purifikasi gas helium. Jumlah filter bekas

diperkirakan sebanyak 10 m³/th, dan jumlah HEPA filter diperkirakan 0,2 m³/th. Umur ekonomis HEPA filter adalah 2-3 th [13]. Limbah padat filter karbon aktif bekas adalah filter yang telah digunakan untuk penangkapan gas iodine, karbon, kripton, dan xenon. Total aktivitas I-131 yang dihasilkan pada akhir siklus reaktor RDE tipe HTR-10 adalah 10¹⁶ Bq atau 2,7x10⁵Ci, aktivitas spesifik I-131 adalah 1,2x10⁵Ci/g maka jumlah I-131 adalah sebesar 2,25g. Karbon aktif mempunyai kapasitas penyerapan sebesar 1 g I-131/kg karbon aktif [13].

Jumlah karbon aktif yang diperlukan untuk menangkap 2,25 g I-131 adalah sebesar 2,25 kg. Bila efisiensi filtrasi dengan karbon aktif berharga 45% maka jumlah limbah karbon aktif pertahun adalah 2,25/ 0.45 atau sebesar 5 kg/th. Limbah padat terkontaminasi zat radioaktif dari kegiatan maintenance mempunyai jumlah 0,28 m³/tahun, yang merupakan limbah LRTR jenis tingkat sangat rendah. Dari system VAC-Off Gas ditimbulkan limbah radioaktif padat prefilter jenis *glass fiber paper*, karbon aktif, dan filter HEPA masing- masing sebanyak 10 m³/th, 5 kg/th, dan 0,2 m³/th.

Pebel moderator grafit yang mengalami kerusakan (gempil, retak, pecah, dll) diklasifikasikan sebagai limbah radioaktif padat tingkat sedang (LRTS) [10, 14, 15] . Jumlah limbah LRTS yang berupa pebel moderator grafit sebanyak 12.690 elemen per 3 tahun atau 4.230 elemen per tahun. Selain itu juga terdapat LRTS berupa grafit bekas dari *carbon brick* konstruksi sipil teras reaktor yang secara berkala (setiap 20 tahun) mengalami pergantian dengan jumlah 23,4 m³/20 th.

Tabel 3. Jenis dan jumlah limbah padat LRTR dari operasi HTR-10

No.	JenisLimbah	Klasifikasi limbah	JumlahLimbah	Kontaminan
1.	Debu moderator grafit	LRTR	160 kg/th	I-131, I-132, I-133, I-134, I-135, C-14, Kr-85, Kr-87, Kr-88, Xe-133, Xe-135.
2.	Karbon aktifbekas	LRTR	10 kg/th	I-131, I-132, I-133, I-134, I-135, C-14, Kr-85, Kr-87, Kr-88, Xe-133, Xe-135.
3.	Filter bekas jenis <i>bag filter</i>	LRTR	5 m ³ /th	I-131, I-132, I-133, I-134, I-135, C-14, Kr-85, Kr-87, Kr-88, Xe-133, Xe-135.
4.	Pre filter jenis <i>glass fiber paper</i>	LRTR	10 m ³ /th	I-131, I-132, I-133, I-134, I-135, C-14, Kr-85, Kr-87, Kr-88, Xe-133, Xe-135.
5.	HEPA filter bekas	LRTR	0,20 m ³ /th	I-131, C-14, dan hasil belah
6.	Limbah padat terkontaminasi dari operasional dan perawatan	LRTR	0,28 m ³ /th	Cs-137 dan Sr-90
7.	Drum filter	LRTR	5 m ³ /th	Cs-137 dan Sr-90
8.	Pebel moderator grafit	LRTS	4.230 elemen/th	Produk fisi dan aktivasi
9.	Grafit (<i>Carbon brick</i>)	LRTS	23,4 m ³ /20 th	Produk fisi dan aktivasi

Limbah Radioaktif Cair

Jenis dan jumlah limbah radioaktif cair dari pengoperasian reactor HTR-10 ditunjukkan pada Tabel 4. Limbah radioaktif cair yang ditimbulkan dari pengoperasian reaktor RDE terdiri dari limbah tingkat sedang dan rendah. Limbah tingkat sedang terdiri dari limbah cair dari sistem purifikasi gas helium, dekontaminasi, laboratorium, dan kebocoran sistem perpipaan. Limbah tingkat rendah terdiri dari limbah *laundry, shower*, dan air pencucian. Limbah radioaktif cair dari sistem

purifikasi gas helium mengandung H-3, Cs-137, Sr-90, dll, masuk pada kategori aktivitas tingkat sedang diperkirakan sebanyak 2,5 m³/tahun. Limbah radioaktif cair dari dekontaminasi, laboratorium, kebocoran sistem perpipaan mengandung Cs-137, Sr-90, dll, pada tingkat aktivitas sedang diperkirakan sebanyak 20 m³/minggu (840 m³/th). Sedangkan limbah cair dari *laundry, shower*, dan air pencucian mempunyai tingkat aktivitas sangat rendah yang pada umumnya dibawah batas nilai klirens, dan diperkirakan sebanyak 35 m³/minggu (1.470 m³/th).

Tabel 4. Limbah Radioaktif Cair LRTR dari Pengoperasian Reaktor HTR-10

No.	Jenis Limbah	Jumlah Limbah m ³ /tahun	Kontaminan
1.	Limbah cair dari sistem purifikasi gas helium	2,5	H-3, C-14, Cs-137, Sr-90, pada tingkat aktivitas sedang.
2.	Limbah radioaktif cair dari dekontaminasi, laboratorium, kebocoran sistem perpipaan	840	Cs-137, Sr-90, pada tingkat aktivitas sedang.
3.	Limbah radioaktif cair dari <i>laundry, shower</i> , dan air pencucian	1.470	Cs-137, Sr-90, pada tingkat aktivitas sangat rendah.

KESIMPULAN

1. Pengoperasian reaktor daya eksperimental tipe HTR-10 menimbulkan limbah radioaktif padat rendah serta limbah radioaktif cair tingkat rendah dan sedang.
2. Limbah padat antara lain berupa grafit moderator, karbon aktif, debu, filter dan benda terkontaminasi, dengan jenis Radionuklida yang dominan adalah: I-131, I-132, I-133, I-134, I-135, C-14, Kr-85, Kr-87, Kr-88, Xe-133 dan Xe-135.
3. Limbah cair antara lain berupa cairan dari system purifikasi, kegiatan dekontaminasi, laundry dan pencucian, dengan jenis Radionuklida yang dominan adalah H-3, C-14, Cs-137, Sr-90 dan Cs-137.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu dalam pembuatan makalah ini, antara lain : Kepala BTPPL, Prof. Ir. Zainus Salimin, M.Si, Drs. Gunandjar, SU, Ir. Mulyono Daryoko, SU, Ir. Aisyah, MT., Mirawaty, S.Si. dan Yuli Purwanto, A.Md., Serta pihak lain yang tidak dapat dicantumkan namanya pada makalah ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. Keputusan Presiden No. 5 Tahun 2000 Tentang Kebijakan Energi Nasional
2. Undang-undang No. 17 Tahun 2007 tentang Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional
3. Rencana Pembangunan Jangka Menengah BATAN 2015-2019, BATAN, 2014
4. Hyedong Jeong and Soon Heung Chang, "Estimation of the Fission Products, Actinides and Tritium of HTR-10", International Journal of Nuclear Engineering and Technology Vol 4 No 5. June 2009, 729-738, 2009.
5. Zongxin Wu, Dengcai Lin, Daxin Zhong, "The Design Features of The HTR-10", Nuclear Engineering and Design 218, Elsevier, 2002
6. BATAN-RENUKO, "Conceptual Design for General Design features of the RDE " RDE-DS-WBS02-01, Jakarta, September 2015.
7. BATAN-RENUKO, "Conceptual Design for Helium Purification Sistem/Helium Supporting Sistem", RDE-DS-WBS02-201-003, Jakarta, September 2015.
8. BATAN-RENUKO, "Helium Purification Scematic Diagram", RDE- DS-WBS02-201-003-002, Jakarta, September 2015.
9. BATAN-RENUKO, "Helium Supply and Storage Sistem KBB Scematic Diagram", RDE-DS-WBS02-201-003-003, Jakarta, September 2015.
10. Mohammad Dhandhang Purwadi, "Teknologi Reaktor Gas Temperatur Tinggi dan Limbahnya", Materi Workshop Pengelolaan Limbah HTR-10, PTLR-BATAN, Serpong, 18 September 2014
11. Sofiltra-Poelman, "Filter and Filter Equipment for Genaral Industry and Nuclear Industry", France, 1985.
12. BATAN-RENUKO, "Radioactive Waste Processing System", RDE-DS-WBS02-211, Jakarta, September 2015
13. Robert H Perry and Don Green, "Chemical Engineering Handbook", Mc Graw Hill, International Edition, 1984.
14. Andrew C., Kadak, Ph.D., "High Temperature Gas Reactors", Massachusetts Institute of Technology, 2011
15. Irson J, " Important Viewpoints Proposed for a Safety Approach of HTGR Reactions in Europe", International Proceeding ICENES, Belgia, 2005.