

# **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

<b>Pengarah</b>	:	1. Kepala Badan Tenaga Nuklir Nasional	- BATAN
		2. Ketua Program Studi Ilmu Lingkungan UI	- UI
<b>Penanggung Jawab</b>	:	Ir. Suryantoro, MT	- BATAN
<b>Penyelenggara</b>			
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> .. <b>Gunandjar dan Yuli Purwanto</b>	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
<b>Wahyu Wikandari, Roekmijati Widaningroem Soemantojo, Tri Edhi Budhi Soesilo</b>	
3 Pengolahan Limbah <i>Methylen Blue</i> Secara Fotokatalisis Dengan TiO <sub>2</sub> Dimodifikasi Fe Dan Zeolit .....	29
<b>Agus Salim Afrozi, Rahmat Salam, Auring R, Asep Nana S</b>	
4. Kinerja Konsorsium Bakteri Dari Sungai Opak Yogyakarta Dalam Reduksi Nitrat Dengan Sumber Karbon Yang Berbeda .....	37
<b>Hanies Ambarsari, Miswanto</b>	
5. Pengelolaan Limbah Radioaktif Hasil Dekontaminasi Di Instalasi Produksi Radioisotop Paska Berhenti Operasi .....	45
<b>Suhaedi Muhammad, Nazaroh, Rr.Djarwanti,RPS</b>	
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
<b>Danang Widiyanto</b>	
7. Sistem Pemurnian Helium Pada Reaktor Daya Experimental (RDE) Tipe HTR-10.....	60
<b>Aisyah, Yuli Purwanto</b>	
8. Pengolahan Limbah Daun Jati Kering Dari Desa Leyangan, Ungaran Menjadi Pulp Kering Dengan Proses Soda .....	68
<b>Linda Kusumaningrum, Heny Kusumayanti</b>	
9 Pembuatan Zat Warna Alami Dari Buah Mangrove <i>Spesies Rhizophora Stylosa</i> Sebagai Pewarna Batik Ramah Lingkungan Dalam Skala Pilot Plan .....	76
<b>Paryanto, Wusana Agung Wibowo, Moch Helmy Aditya</b>	
10 Konsentrasi Faktor Pada Bioakumulasi Plutonium Oleh Siput Macan ( <i>Babylonia Spirata L.</i> ) Di Perairan Teluk Jakarta .....	82
<b>Murdahayu Makmur , Muhammad Qowi Fikri, Defri Yona, Syarifah Hikmah JS</b>	
11. Pengaruh Koefisien Distribusi <sup>137</sup> Cs Pada Keselamatan Calon Tapak Fasilitas Disposasi Limbah Radioaktif .....	93
<b>Budi Setiawan, Dadang Suganda</b>	
12. Kajian Pengolahan Limbah Radioaktif Cair Menggunakan Beberapa Adsorben .....	105
<b>Mirawaty, Gustri Nurliati</b>	

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

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

## PERHITUNGAN JUMLAH LIMBAH PASKA DEKOMISIONING REAKTOR TRIGA MARK II BANDUNG

**Sutoto, Kuart Heriyanto, Mulyono Daryoko**

*Pusat Teknologi Limbah Radioaktif-Badan Tenaga Nuklir Nasional  
Kawasan Puspiptek Serpong Gedung 50, Tangerang Selatan, Banten 15310*

E-mail: [daryoko@batan.go.id](mailto:daryoko@batan.go.id)

### ABSTRAK

Perhitungan jumlah limbah paska dekomisioning Reaktor Triga Mark II Bandung. Reaktor Triga Mark II, Bandung mulai dioperasikan pada tahun 1965 pada daya 250 kW. Pada tahun 1971 daya reaktor ditingkatkan menjadi 1000 kW. Pada tahun 1996 operasi reaktor diberhentikan untuk ditingkatkan dayanya menjadi 2000 kW dan selesai pada tahun 2000, dan dilakukan komisioning kembali pada tahun 2001. Karena umurnya sudah relatif tua, maka perencanaan dekomisioning harus telah disiapkan. Tahap awal yang harus dilakukan adalah inventarisasi radionuklida yang terkandung pada komponen-komponen inti reaktor dan sekitarnya. Ada perhitungan ini digunakan computer code ORIGEN 2, sehingga bisa diperkirakan secara kualitatif maupun kuantitatif kategori radionuklida pada masing-masing komponen tersebut, apakah termasuk limbah radioaktif aktivitas sangat rendah atau dibawah clearance level, limbah radioaktif aktivitas rendah, dan limbah radioaktif aktivitas sedang. Kesimpulan yang diperoleh adalah perkiraan inventarisasi limbah hasil dekomisioning reaktor Triga Mark II pada komponen utama adalah limbah aktivitas rendah lebih kurang 104,955 ton (15, 21%), limbah aktivitas sedang lebih kurang 37,847 ton (5,60%) dan limbah aktivitas sangat rendah atau di bawah clearance level lebih kurang 533,600 ton (78,89%).

Kata Kunci : jumlah, limbah, Triga Mark II, Bandung

### ABSTRACT

**WASTE INVENTORY FROM DECOMMISSIONING OF TRIGA MARK II REACTOR, BANDUNG.** *Assessment of waste inventory calculation results from decommissioning of Triga Mark II reactor Bandung has been carried out. Triga Mark II reactor Bandung started operation in 1965 on the power of 250 kW. In 1971, the reactor power was increased to 1000 kW. In 1996 dismissed the reactor operation to be upgraded to year of 2000 kW and was completed in year of 2000, and commissioning is done back in year of 2001. Due to relatively old age, then the decommissioning plan should have been prepared. The initial phase is to do an inventory of radionuclides contained in the components of the reactor core and its surroundings. This inventory was used a computer code ORIGEN 2, so that it can be qualitatively and quantitatively estimated radionuclide categories in each of these components, including radioactive waste activity is very low or below the clearance levels, low level activity radioactive waste, and intermediate level radioactive waste. The conclusion is obtained the estimation of waste inventory from the decommissioning of main component revealed that of Triga Mark II reactor, i.e: the low level activity waste approximately 104.955 tons (15, 21%), the intermediate level waste activity is approximately 37.847 tons (5.60%) and very low activity waste or below the clearance level is approximately 533.600 tons (78.89%).*

Keywords : inventory , waste , Triga Mark II, Bandung

### PENDAHULUAN

Reaksi neutron dengan bahan bakar nuklir akan menghasilkan tiga kelompok radionuklida, yaitu produk aktivasi, aktinida dan produk fisi[1,2,3]. Unsur-unsur kimia yang terdapat pada komponen-komponen di sekitar reaktor (komponen utama), seperti beton, reflektor, *biological shielding*, *lazy susan*, *bellow*, *beam port*, *fuel rack*, *grid*, sistem pendingin primer (Gambar 1), juga mengalami reaksi aktivasi, sehingga komponen-komponen tersebut menjadi radioaktif. Pada Tabel 1 disajikan nuklida awal yang teraktivasi dan hasil aktivasinya. Disamping terjadinya reaksi aktivasi, komponen-komponen tersebut juga bisa

terkontaminasi radionuklida-radionuklida yang berasal dari reaksi aktivasi, hasil fisi maupun aktinida dari bahan bakar uranium[1,2,3,4].

Di bawah ini dijelaskan kemungkinan terjadinya radionuklida pada komponen-komponen utama ini:

#### 1. Aktivasi

Hasil aktivasi komponen-komponen utama ini antara lain adalah:  $^{55}\text{Fe}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{63}\text{Ni}$ ,  $^{94}\text{Nb}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{152}\text{Eu}$  dan  $^{154}\text{Eu}$  yang berasal dari nuklida:  $^{54}\text{Fe}$ ,  $^{55}\text{Mn}$ ,  $^{59}\text{Co}$ ,  $^{62}\text{Ni}$ ,  $^{93}\text{Nb}$ ,  $^{132}\text{Ba}$ ,  $^{161}\text{Eu}$  dan  $^{153}\text{Ru}$ .

#### 2. Kontaminasi dari produk fisi.

Kontaminasi hasil fisi secara umum ada 2 macam: *loose contamination*, yaitu kontaminasi yang hanya terjadi pada

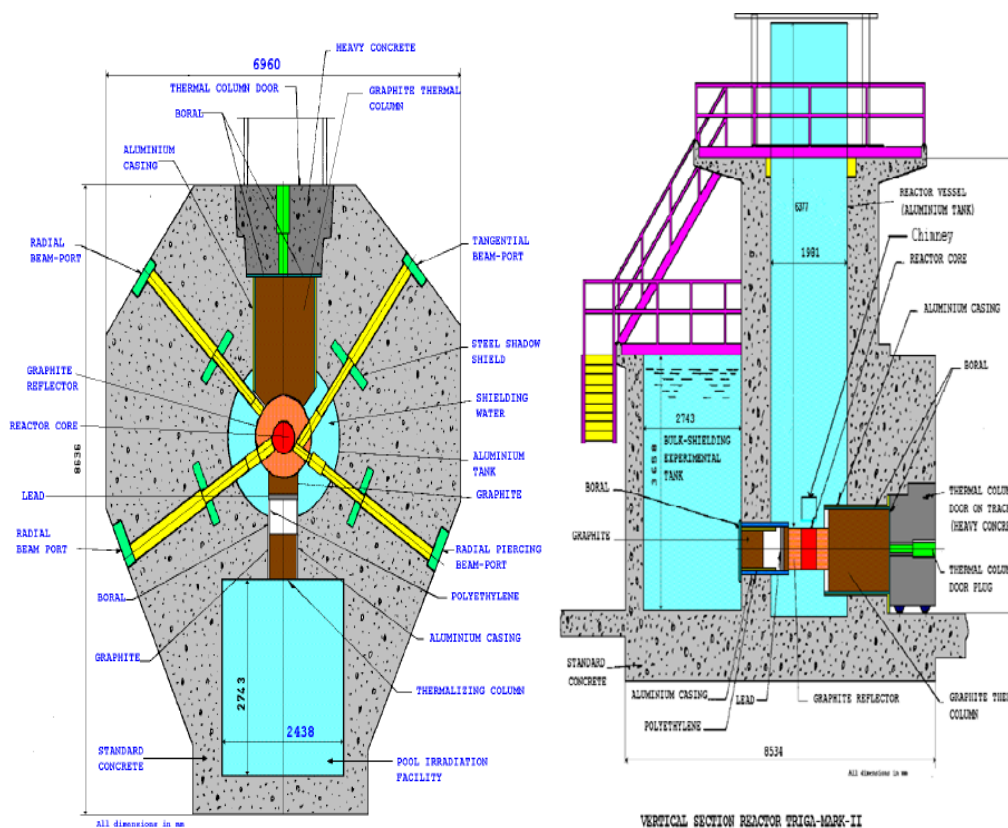


permukaan luar dan mudah didekontaminasi, dan *fixed contamination*, yang lebih sulit untuk dilakukan dekontaminasi. Kontaminasi ini bisa merupakan produk fisi, atau hasil *leaching* dari produk aktivasi dan aktinida yang terbawa oleh aliran air pendingin. Radionuklida yang penting dari produk fisi adalah:  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{129}\text{I}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{154}\text{Ce}$ , dari aktinida adalah:  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{242}\text{Cm}$ ,  $^{244}\text{Cm}$ , dan dari isotop uranium adalah:  $^{232}\text{U}$ ,  $^{233}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{236}\text{U}$  dan  $^{239}\text{U}$  [1]. Namun karena yang terjadi pada komponen utama ini adalah *loose contamination*, dan mudah didekontaminasi sebelumnya, maka dianggap bahwa kontaminasi dari produk fisi ini tidak

berpengaruh terhadap kandungan radionuklida pada komponen-komponen utama ini.

Bilamana inventarisasi radionuklida pada komponen-komponen utama tersebut telah diketahui, dan masing-masing diketahui aktivitasnya maka kemudian limbah radioaktif pada komponen tersebut bisa dipetakan, termasuk akan diketahui juga apakah limbah tersebut limbah radioaktif tingkat sangat rendah atau di bawah *clearance level*, tingkat rendah, sedang atau tinggi.

Penelitian ini ditujukan untuk menganalisis kandungan radionuklida pada bahan komponen-komponen utama tersebut, dan kemudian menganalisis limbah radioaktifnya.



Gambar 1. Reaktor Triga Mark II, Bandung (penampang horisontal dan vertikal) [2,6]

## METODOLOGI

### Peralatan dan bahan

Dalam kegiatan ini diperlukan data-data yang berasal dari pustaka, software ORIGEN 2 dan data dari peninjauan langsung di lapangan dengan objek Reaktor Triga Mark II Bandung.

## Metode

### 1. Inventarisasi radionuklida pada material-material inti reaktor dan sekelilingnya

Pada inventarisasi ini radionuklida dilakukan dengan menggunakan data-data sekunder dari berbagai pustaka dari data hasil peninjauan langsung di lapangan seperti material komponen, fungsi komponen, sejarah pengoperasian, *effective full power years (EFPY)*, daya, flux, jarak antara waktu *shutdown*

dengan waktu dekomisioning, dan berat komponen. Dengan data tersebut maka dapat diestimasi peta radionuklida pada masing-masing

material tersebut. Inventarisasi radionuklida ini dilakukan dengan menggunakan *computer code ORIGEN 2*.

Tabel 1. Nuklida Asal, Nuklida Hasil, Pancaran Nuklida Hasil dan Umur Parohnya[3]

Nuklida asal	Partikel sinar penembak dan yang dihasilkan	Nuklida hasil	Sinar dan partikel yang dipancarkan nuklida hasil	Umur paroh nuklida hasil (tahun)	Kelimpahan nuklida dalam unsur (%)
Li-6	n, $\alpha$	H-3	$\beta^-$	12.3	7.5
C-13	n, $\gamma$	C-14	$\beta^-$	5730	1.1
N-14	n, p	C-14	$\beta^-$	5730	99.6
Na-23	n, 2n	Na-22	$\beta^+$ , EC	2.6	100
Na-23	$\gamma$ , n	Na-22	$\beta^+$ , EC	2.6	100
Cl-35	n, $\gamma$	Cl-36	$\beta^-$ ( $\beta^+$ , EC)	301000	75.8
K-39	n, p	Ar-39	$\beta^-$	269	93.3
Ca-40	n, $\gamma$	Ca-41	EC	103000	96.9
Fe-54	n, p	Mn-54	EC, $\gamma$	0.86	5.9
Mn-55	n, 2n	Mn-54	EC, $\gamma$	0.86	100
Fe-54	n, $\gamma$	Fe-55	EC, X	2.7	5.9
Ni-58	n, $\gamma$	Ni-59	EC, X	76000	68.3
Ni-62	n, $\gamma$	Ni-63	$\beta^-$	100	3.6
Co-59	n, $\gamma$	Co-60	$\beta^-$ , $\gamma$	5.3	100
Zn-64	n, $\gamma$	Zn-65	EC, $\beta^+$	0.67	48.6
Zr-92	n, $\gamma$	Zr-93	$\beta^-$	1500000	17.1
Mo-92	n, $\gamma$	Mo-93	EC, X	3500	14.8
Nb-93	n, $\gamma$	Nb-93m	IT, X	15.8	100
Nb-93	n, $\gamma$	Nb-94	$\beta^-$ , $\gamma$	20000	100
Mo-94	n, p	Nb-94	$\beta^-$ , $\gamma$	20000	9.3
Mo-98	n, $\gamma$	Tc-99	$\beta^-$	213000	24.1
Ag-107	n, $\gamma$	Ag-108m	EC, $\gamma$	130	51.8
Ag-109	n, $\gamma$	Ag-110m	$\beta^-$ , $\gamma$	0.68	48.2
Sn-124	n, $\gamma$	Sb-125	$\beta^-$ , $\gamma$	2.76	5.8
Ba-132	n, $\gamma$	Ba-133	EC, X, $\gamma$	10.5	0.1
Eu-151	n, $\gamma$	Eu-152	EC, X, $\beta^-$ , $\gamma$	13.5	47.8
Eu-153	n, $\gamma$	Eu-154	$\beta^-$ , $\gamma$ , X	8.6	52.2
Eu-154	n, $\gamma$	Eu-155	$\beta^-$ , $\gamma$ , X	4.76	0
Ho-165	n, $\gamma$	Ho-166m	$\beta^-$ , $\gamma$ , X	1200	100

## 2. Estimasi kualitatif dan kuantitatif limbah radioaktif pada material-material inti utama

Berdasarkan peta radionuklida pada masing-masing material, kemudian data-data tersebut dijumlahkan maka akan bisa terlihat, baik kualitatif maupun kuantitatif limbah dari masing-masing material tersebut.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### 1. Inventarisasi radionuklida pada material-material inti reaktor dan sekelilingnya

EFPY reaktor Triga Mark II Bandung dicari dari berbagai pustaka, dan kemudian

dilakukan diskusi dengan manajemen dan operator reaktor Triga Mark II, Bandung dengan menggali log book operasinya, maka diperoleh data-data sbb.:

1. tahun 1965 - 1971 dengan daya 250 kW, EFPY = 2 tahun
2. tahun 1971 - 1996 dengan daya 1 MW, EFPY = 6,68 tahun
3. tahun 2001 – sekarang dengan daya 2 MW, EFPY = 0,68 tahun

Data-data flux dari berbagai komponen reaktor Kartini (Triga Mark II) dengan daya 100 kW, seperti terlihat pada Tabel 2. Data-data flux reaktor Triga Mark II Bandung dapat diturunkan dari data-data flux reaktor Kartini, dengan harga flux yang berbanding lurus dengan dengan daya

reaktor Kartini [1]. Sebagai contoh harga flux reflektor reaktor Triga Mark II, Bandung (1 MW)  
 $= 1000/100 \times 2,578E+11 = 2,578E+12$ .

Demikian pula dengan komponen-komponen yang lain.

Tabel 2. Data flux pada komponen-komponen reaktor Kartini (daya 100kW)

No	komponen	fluks netron
1	<i>grade plate core</i>	8,716E+11
2	<i>Reflector</i>	2,578E+11
3	<i>Lazy susan</i>	2,578E+11
4	<i>Beamport</i>	
	<i>Inner part</i>	1,727E+10
	<i>Outer part</i>	1,290E+08
5	<i>Tank</i>	2,290E08
6	<i>Thermal column dry</i>	
	<i>Inner part</i>	1,727E+10
	<i>Outer part</i>	2,290E+08
7	<i>Thermal column wet</i>	
	<i>Inner part</i>	1,727E+10
	<i>Outer part</i>	2,290E+08
8	<i>Detector column</i>	1,727E+10
9	<i>Control rod column</i>	1,115E+12
10	<i>Supporting core</i>	1,727E+10
11	<i>Supporting leg core</i>	2,290E+08
12	<i>Shielding reactor</i>	<2E+08

Komposisi unsur dari masing-masing komponen dicari dari berbagai pustaka, yang akhirnya didapatkan data-data. Sebagai contoh komposisi

pada komponen grafit[1], seperti terlihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Komposisi grafit

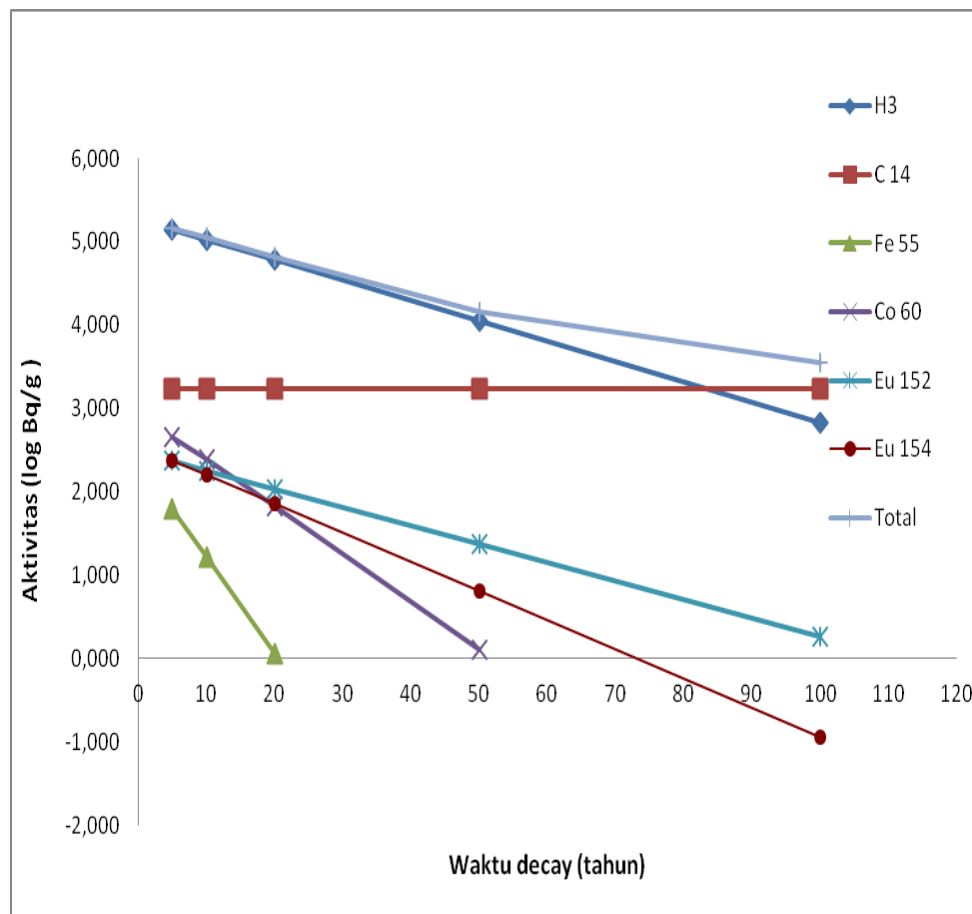
Bahan	Unsur	Konsentrasi (ppm)
<i>Graphite</i>	<i>Lithium</i>	0,1
	<i>Carbon</i>	10 <sup>6</sup>
	<i>Nitrogen</i>	4
	<i>Chlorine</i>	4,3
	<i>Calcium</i>	41
	<i>Iron</i>	4,3
	<i>Cobalt</i>	0,012
	<i>Nickel</i>	3,65
	<i>Niobium</i>	1
	<i>Silver</i>	0,01
	<i>Tin</i>	0,05
	<i>Barium</i>	1
	<i>Samarium</i>	0,02
	<i>Europium</i>	6 x 10 <sup>-4</sup>
	<i>Mercur</i>	0,04
<i>Uraniu</i>	0,1	

Dari data-data yang didapat pada masing-masing komponen di atas (EFPY, flux, komposisi dan berat masing-masing komponen), dengan ORIGEN 2 akan diperoleh inventarisasi radionuklida pada komponen inti reaktor dan sekitarnya (reflektor, *thermal column*, *thermalizing column*, *biological shielding*, *Control Rod Column*, *Detector Column*, *Grid Plate*, *Supporting Core*, *Supporting Leg Thermal Column Core*, Tangki Reaktor, *Lazy Susan*, *Beam Port*). Pada perhitungan ini disumsikan dekomisioning dilakukan 5 tahun setelah *shut down*.

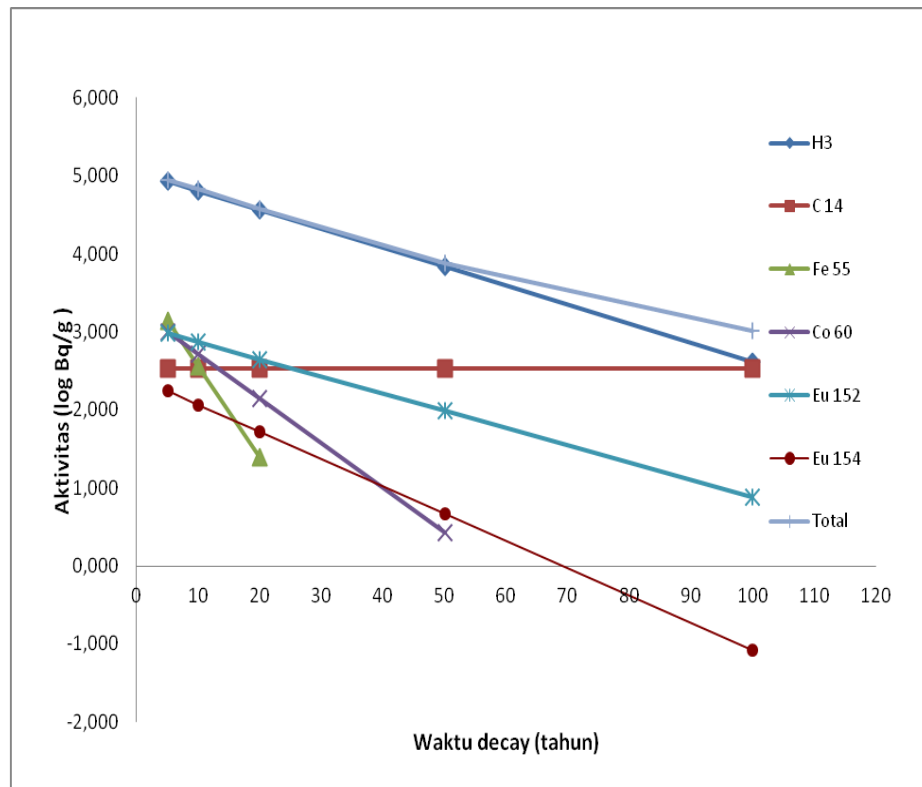
Sebagai contoh data salah satu komponen utama (reflektor) yang sekarang terpasang dimulai pemakaiannya sejak reaktor diupgrade pada tahun 2001 dengan daya 2 MW, sedangkan reflektor yang sekarang dilimihkan digunakan sejak tahun 1971 sampai dengan tahun 1996, dengan daya 1 MW. Oleh karena itu dalam perhitungan ini kedua reflektor tersebut dipisahkan. Perhitungan lapisan aluminium pada reflektor dilakukan secara terpisah juga. Reflektor terbuat dari grafit yang dilapisi

aluminium berfungsi untuk merefleksikan flux ke arah column (*thermal column* dan *thermalizing column*). Perhitungan inventarisasi radionuklida pada reflektor, dianggap merata untuk seluruh reflektor. Kandungan radionuklida yang terdapat di dalam reflektor adalah H-3, C-14, Fe-55, Co-60, Eu-152 dan Eu-154, dengan jumlah radionuklida pada operasi pertama 1 MW adalah  $1,0 \times 10^4$  Bq/gram, sedangkan aktivitas reflektor pada operasi 2 MW adalah  $9,0 \times 10^3$  Bq/gram. Kandungan radionuklida pada lapisan aluminium adalah Al-28, Fe-55, Co-60, Ni-63 dan Zn-65, dengan aktivitas pada operasi reaktor dengan daya 1 MW adalah  $7,0 \times 10^3$  Bq/gram, sedangkan aktivitas pada daya 2 MW adalah  $2,0 \times 10^5$  Bq/gram. Hasil dari inventarisasi reflektor tersebut bisa dilihat pada Gambar 2 dan Gambar 3.

Dengan cara seperti itu, maka inventarisasi radionuklida seluruh komponen-komponen utama bisa diketahui, seperti yang terlihat pada Gambar 4.



Gambar 2. Hasil inventarisasi radionuklida reflector dengan daya 2 MW



Gambar 3. Hasil inventarisasi radionuklida reflektor dengan daya 1 MW

Dari Gambar 4, maka aktivitas total dan aktivitas spesifiknya (Bq/g). dari masing-masing unsur pada masing-masing komponen bisa diketahui, dengan menganggap inventarisasi ini dilakukan pada saat 5 tahun setelah *shut down*. Kemudian

pada Gambar 5 adalah klasifikasi limbah radioaktif dan jumlahnya apakah dibawah *clearance level* (*free release*), limbah aktivitas rendah (*low level waste*), atau limbah aktivitas sedang (*intermediate level waste*).

Tabel 4. Aktivitas radionuklida komponen- komponen utama

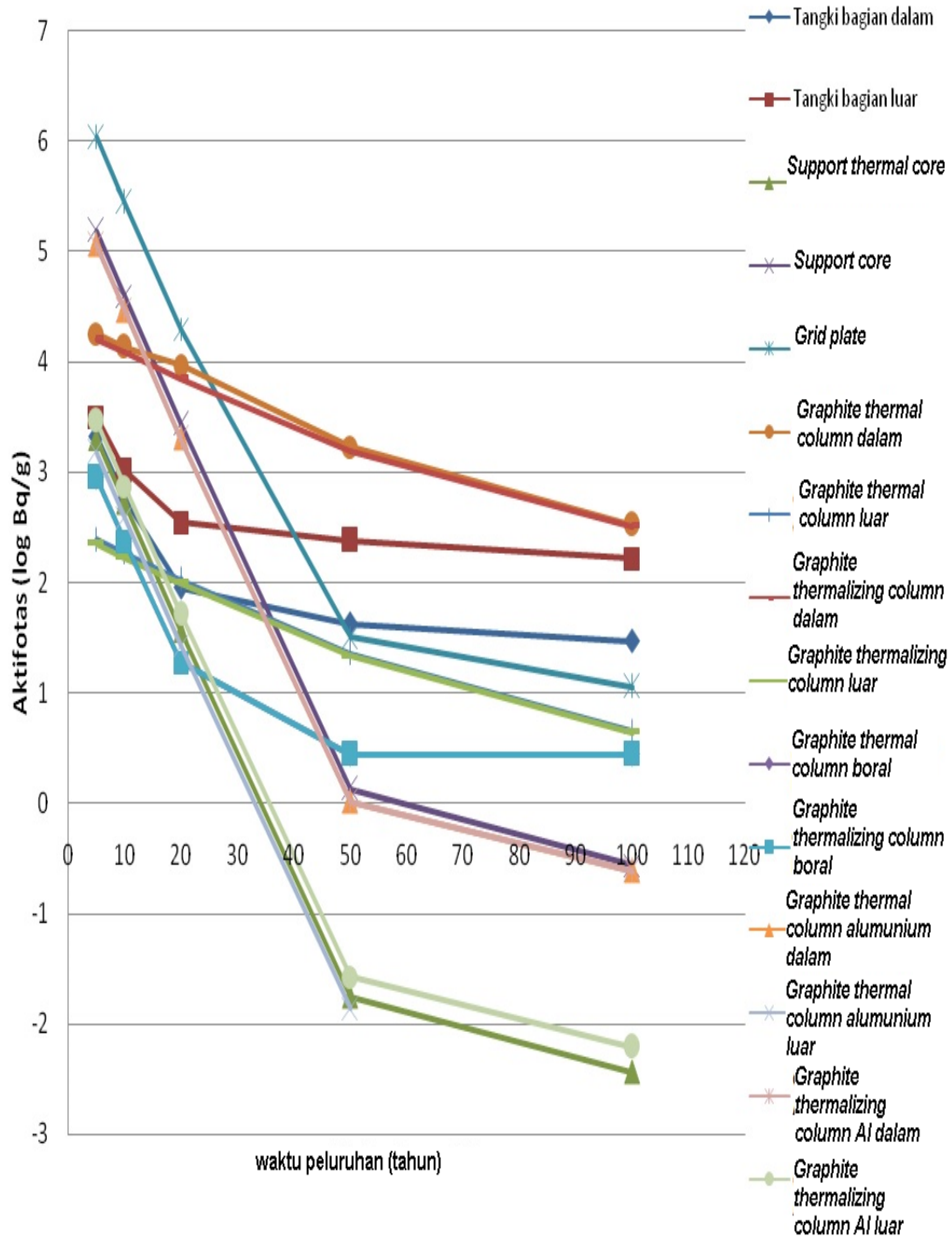
komponen	berat, kg	aktivitas total, bq	aktivitas spesik, bq/g
grafit	6.519	223.193	34.235
baja tahan karat	355	3.563.011	10.030.246
aluminium	2.528	312.455	123.575
beton	667.000	1.017.035	1.524
jumlah	676.402		

Tabel 5. Klasifikasi limbah radioaktif

komponen	dibawah <i>clearance level</i>	LLW, kg	ILW,kg
grafit	-	3.259	3.259
baja tahan karat	-	355	-
aluminium	-	1.645	882
beton	533.600	100.050	33.350
jumlah	533.600	104.955	37.847

Seperti terlihat pada data-data di atas maka perkiraan inventarisasi limbah hasil dekomisioning reaktor Triga Mark II pada komponen utama setelah 5 tahun *shut down* adalah limbah aktivitas rendah lebih kurang 304,955 ton (15, 21%), limbah aktivitas sedang lebih kurang 37,847 ton (5,60%) dan limbah aktivitas sangat rendah atau di bawah *clearance level* lebih kurang 533,600 ton (78,89%).

Data inventarisasi limbah ini sangat penting untuk memperkirakan biaya dekomisioning reaktor Triga Mark II, Bandung, khususnya untuk biaya pengelolaan limbah dan biaya dismantling. Biaya dekomisioning ini pada tahap awal sangat diperlukan untuk mempersiapkan pendanaannya.



Gambar 4. Hasil inventarisasi radionuklida pada komponen-komponen utama

## KESIMPULAN

Dari penelitian ini bisa disimpulkan bahwa perkiraan inventarisasi limbah hasil dekomisioning reaktor Triga Mark II pada komponen utama setelah 5 tahun *shut down* adalah limbah aktivitas rendah lebih kurang 304,955 ton (15, 21%), limbah aktivitas sedang lebih kurang 37,847 ton (5,60%) dan limbah aktivitas sangat rendah atau di bawah *clearance level* lebih kurang 533,600 ton (78,89%). Dari data inventarisasi ini dapat diperkirakan biaya dan dana yang disiapkan untuk dekomisioningnya.

## DAFTAR PUSTAKA

1. International Atomic Energy Agency (2002), *Radiological Characterization of Shut Down Nuclear Reactor for Decommissioning Purposes*, IAEA-TRS No. 389, Vienna.
2. Daryoko, M., and Saryati (2007), *Radiological Characterization analysis of Graphite Reflector for Waste Management Policy*, MIPA, UGM.
3. Daryoko, M., and Gunandjar (2003), *Inventarisasi Radionuklida dalam Komponen Nuklir*, Jurnal Teknologi Pengolahan Limbah, ISSN 1410-9565, Volume 6 Nomor 1, Jakarta.
4. International Atomic Energy Agency, "Decommissioning Techniques for Research Reactor", Final Report of a Coordinated Research Project, 1997-2001, IAEA-TECDOC-1273, Vienna, 2002
5. International Atomic Energy Agency (2009), *Research Reactor Modernization and Refurbishment, Upgrade of the Bandung Triga 2000 Reactor*, IAEA-TECDOC-1625, Vienna (2009).
6. Anonymous, *Reaktor Triga 2000 Bandung*, Available: <http://airamadhan.wordpress.com/2008/05/27/reaktor-triga-2000-bandung/> diakses pada 7 November 2011.
7. Peraturan Pemerintah (PP) Republik Indonesia No. 61 Tahun 2013 tentang Pengolahan Limbah Radioaktif.