

ANALISIS LIMBAH RESIN DI REAKTOR SERBA GUNA GA. SIWABESSY TAHUN 2008

NUGRAHA LUHUR, UNGGUL H, Y. SUMARNO, TRI ANGGONO, A. FAHMI MUSLIMU

*Pusat Reaktor Serba Guna-BATAN
Kawasan Puspitek Serpong, Tangerang 15310, Banten
Telp. 021.7560908, Faks. 7560573*

Abstrak

ANALISIS LIMBAH RESIN DI REAKTOR SERBA GUNA GA. SIWABESSY TAHUN 2008. Telah dilakukan analisis kualitatif dan kuantitatif limbah resin RSG-GAS pada tahun 2008. Analisis kualitatif diperlukan untuk mengetahui kandungan radionuklida dalam limbah resin dan analisis kuantitatif diperlukan untuk mengetahui tingkat radioaktivitas limbah resin yang hasilnya dapat dipergunakan sebagai bahan pertimbangan dalam penanganan dan pengolahan limbah berikutnya. Analisis dilakukan dengan cara pengambilan cuplikan dalam tangki penampungan secara acak sebelum dikirim ke tempat pengolahan limbah, kemudian dilakukan pencacahan menggunakan spektroskopi gamma dengan detektor Hp Ge dan program Multi Channel Analyzer (MCA) Maestro 3.2. Hasil analisis terukur radionuklida Mn-54, Zn-65, Co-60 dan Sb124 yang ditimbulkan dari korosi bahan struktur di dalam sistem pendingin primer yang teraktivasi dan nuklida Cs-137 yang disebabkan oleh produk fisi dari pengotor bahan bakar yang tidak dapat didekontaminasi selama proses produksi dan terbawa air pendingin primer kemudian tertangkap oleh filter resin. Pada bulan Mei 2008 PRSG mengirimkan limbah resin sebanyak 7000 liter dengan aktivitas total sebesar 345076199.9 Bq atau sebesar 49296,59998 Bq/7000 liter ($1,331008 \cdot 10^{-3} \text{ Ci/m}^3$) ke PTLR.

Kata Kunci: resin RSG-GAS 2008

Abstract

ANALYSIS OF WASTE OF SPENT RESIN IN MULTIPURPOSE REACTOR GA. SIWABESSY OF THE YEAR 2008. Qualitative and quantitative analysis of waste of spent resin in RSG-GAS have been conducted in the year 2008. Qualitative analysis is needed to find out the content of radionuclide in spent resin and quantitative analysis is needed to find out concentration radioactivity of spent resin where both can be used as a deliberation in handling the next waste treatment. The used is by sampling the resin from the tank before it is sent to the waste treatment place. After that the resin is counted by using gamma spectroscopy with Hp Ge detector and program of multi channel analyzer Maestro 3.2. From the analysis result measured radionuclides Mn-54, Zn-65, Co-60 and Sb124 which appear from corrosion structure material in activated primary cooling system and radionuclides Cs-137 which caused by fission product of fuel element pollutant that can not be decontamination during production process and taken along with primary cooling water and then caught by resin filter. On May 2008 PRSG send the waste of spent resin as much as 7000 liters with total activity 345076199.9 Bq or as big as 49296,59998 Bq/7000 liters ($1,331008 \cdot 10^{-3} \text{ Ci/m}^3$) to PTLR.

Keywords: resin former RSG-GAS 2008

PENDAHULUAN

Pengoperasian fasilitas nuklir seperti Reaktor Serba Guna GA.Siwabessy (RSG-GAS) akan menimbulkan bahan radioaktif atau bahan terkontaminasi yang pada akhirnya harus

diperlakukan sebagai limbah radioaktif. Berdasarkan Undang Undang Ketenaganukliran No.10 tahun 1997 yang dimaksud dengan limbah radioaktif adalah zat radioaktif dan atau bahan serta peralatan yang telah terkena zat radioaktif atau menjadi radioaktif karena

pengoperasian instalasi nuklir yang tidak dapat digunakan lagi ^[1]. Limbah radioaktif mempunyai potensi bahaya radiasi sehingga dalam pengelolaannya harus memperhatikan aspek keselamatan terhadap pekerja, masyarakat, dan lingkungan. Pengelolaan limbah radioaktif merupakan rangkaian kegiatan yang meliputi pengumpulan, pemilahan, pengelompokan, pengolahan, pengangkutan dan penyimpanan dan atau pembuangan limbah serta pemantauan keselamatan radiasi terhadap pekerja, masyarakat dan lingkungan.

Dalam pengelolaan limbah radioaktif maka limbah harus diklasifikasikan berdasarkan sifat-sifat dari limbah tersebut untuk membantu dalam proses pengelolaan limbah radioaktif selanjutnya. Secara sederhana untuk keperluan pengelolaan limbah radioaktif klasifikasi limbah dapat dilakukan berdasar sifat fisika (padat, cair, dan gas). Akan tetapi untuk keperluan proteksi radiasi klasifikasi limbah radioaktif dominan berdasarkan sifat radiologi dari limbah. Badan Tenaga Atom Internasional (IAEA) memberikan klasifikasi limbah radioaktif berdasarkan tingkat aktivitas dan potensi pembangkitan panas oleh bahan radioaktif. Panduan yang diberikan oleh IAEA sebagaimana tercantum dalam dokumen IAEA Safety Series No. 111-G-1.1 membagi limbah radioaktif dalam tiga tingkatan sebagai berikut ^[2].

1. Limbah radioaktif dikecualikan yaitu limbah radioaktif yang dikeluarkan dari pengawasan karena potensi bahaya radiologinya dapat diabaikan. Batasan aktivitas jenis limbah radioaktif untuk dapat dikategorikan sebagai limbah dikecualikan ditetapkan oleh Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN).
2. Limbah radioaktif aktivitas rendah dan sedang yang dikelompokkan menjadi limbah yang mengandung radionuklida dengan umur paroh pendek ($T_{1/2} \leq 30$ th) dan yang mengandung radionuklida dengan umur paroh panjang ($T_{1/2} \geq 30$ th) dengan aktivitas radionuklida pemancar alpha antara 400 Bq/gram sampai dengan 4000 Bq/gram.
3. Limbah radioaktif aktivitas tinggi adalah limbah radioaktif yang dalam penanganannya memerlukan perisai

(shielding) dan pendingin, seperti limbah yang ditimbulkan dari proses daur ulang bahan bakar, dan radionuklida hasil fisi.

Limbah radioaktif yang di timbulkan oleh RSG-GAS meliputi limbah padat, gas, cair, dan semi cair. Pada tulisan ini hanya akan dibahas tentang limbah radioaktif semi cair yang ada di RSG-GAS. Limbah semi cair tersebut berupa limbah resin bekas pakai. Di RSG-GAS untuk menghilangkan kotoran hasil aktivasi dan kotoran mekanik di dalam air pendingin primer dan untuk menjaga kualitas air pendingin primer pada tingkat yang dispesifikasikan maka pada sistem pendingin primer dilengkapi dengan tiga buah sistem pemurnian air. Sistem pemurnian air tersebut adalah sistem pemurnian air kolam reaktor (KBE 01), sistem pemurnian lapisan air hangat (KBE 02), dan sistem pemurnian kolam penyimpanan bahan bakar bekas (FAK 01) ^[3]. Pada masing-masing sistem pemurnian air pendingin primer terdapat filter mekanik dan filter penukar ion. Jenis penukar ion yang digunakan pada filter penukar ion merupakan campuran resin penukar anion dan kation yang berkualitas nuklir. Dengan bertambahnya waktu penggunaan, maka filter resin tersebut mengalami kejenuhan. Parameter kondisi filter resin ditentukan oleh besarnya nilai beda tekanan dan tingkat radioaktivitas serta konduktivitas air keluaran filter resin. Apabila salah satu atau lebih parameter kondisi filter resin mencapai nilai yang ditentukan, maka filter resin harus diganti dengan resin yang baru ^[4]. Filter limbah resin tersebut merupakan resin yang telah terkontaminasi yang pada akhirnya harus diperlakukan sebagai limbah radioaktif.



Gambar 1. Limbah Resin dalam Drum
Volume 100 Liter

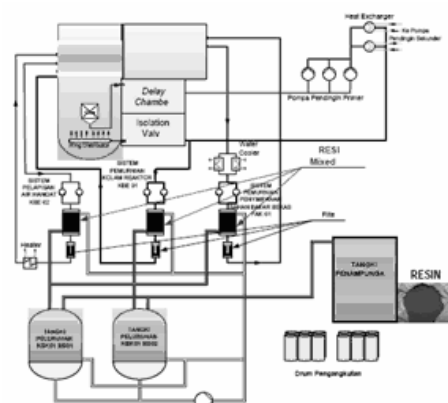
Analisis kuantitatif terhadap limbah radioaktif resin diperlukan untuk mengetahui tingkat konsentrasi radioaktivitas resin sehingga dapat diperhitungkan nilai aktivitas limbah resin yang ditimbulkan dari masing-masing sistem pemurnian air pendingin primer. Analisis kualitatif dapat bermanfaat untuk penanganan dalam pengolahan limbah berikutnya. Hasil analisis kualitatif dan kuantitatif dapat dipergunakan sebagai bahan kajian dari sistem pemurnian air atau struktur komponen reaktor. Dari uraian analisis yang dilakukan dapat pula diusulkan metode penanganan atau pengolahan limbah resin yang lebih baik (menguntungkan) untuk menjawab kekurangan yang ditemukan.

Metode yang digunakan dalam menganalisis limbah resin RSG-GAS adalah dengan melakukan pengambilan cuplikan limbah resin secara acak dari tangki penampungan limbah resin sebelum di kirim ke tempat pengolahan limbah radioaktif di Pusat Teknologi Limbah Radioaktif (PTLR). Cuplikan resin kemudian dilakukan pencacahan menggunakan spektrometer gamma untuk dianalisis secara kualitatif dan kuantitatif.

PENGELOLAAN LIMBAH RESIN DI RSG-GAS

Sistem pemurnian air kolam reaktor KBE 01, sistem pemurnian lapisan air hangat KBE 02, dan sistem pemurnian kolam penyimpanan bahan bakar bekas FAK 01 merupakan bagian dari upaya pengolahan limbah radioaktif.

Limbah radioaktif yang ditimbulkan akibat dari beroperasinya RSG-GAS. Pada saat penggantian resin, semua limbah resin dari sistem pemurnian air kolam reaktor KBE 01, sistem pemurnian lapisan air hangat KBE 02 dan sistem pemurnian kolam penyimpanan bahan bakar bekas FAK 01 dikeluarkan dari tangki sistem pemurnian dan dialirkan menggunakan pompa untuk ditampung di dalam tangki penampungan limbah resin KBK 01. Penggantian resin dari tiga buah sistem pemurnian air pendingin primer dilakukan secara bergantian dan waktunya tidak bersamaan. Di dalam tangki penampungan limbah resin KBK 01 limbah resin diluruhkan selama 6 bulan agar aktivitas menjadi lebih rendah. Setelah resin meluruh selama 6 bulan resin dipindahkan ke dalam tangki penampungan di ruang akses keluar masuk barang untuk dipisahkan airnya (ditiriskan). Setelah air dalam limbah resin terpisah, limbah resin dimasukkan ke dalam drum berkapasitas 100 liter yang telah dilapisi plastik atau karung kemudian diberi nomor dan label limbah radioaktif. Sebelum limbah resin dikirim ke Pusat Teknologi Limbah Radioaktif limbah resin diambil sampling untuk dilakukan analisis kandungan radionuklida. Pengambilan cuplikan atau cuplikan dilakukan secara acak bersamaan dengan pemindahan resin ke dalam drum 100 liter. Pada bulan Mei tahun 2008 PRSG telah melakukan pengiriman limbah resin sebanyak 70 drum berkapasitas 100 liter ke Pusat Teknologi Limbah radioaktif. Sistem pemurnian air pendingin primer dan pengelolaan limbah resin di RSG GAS dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Sistem Pemurnian Air Pendingin Primer
dan Pengelolaan Limbah Resin di RSG-GAS

ANALISIS MENGGUNAKAN SPEKTROMETER GAMMA

Spektrofotometer gamma dapat diartikan sebagai suatu cara pengukuran dan identifikasi zat-zat radioaktif dengan jalan mengamati spektrum karakteristik yang ditimbulkan oleh interaksi foton gamma yang dipancarkan oleh zat-zat radioaktif kepada detektor. Pengukuran menggunakan spektrometri gamma merupakan metoda pengukuran bersifat relatif sehingga sebelum digunakan dalam pengukuran untuk keperluan analisis, sistem spektrometer gamma harus dilakukan kalibrasi agar dapat digunakan untuk analisis. Ada 2 macam kalibrasi yang perlu dilakukan, yaitu kalibrasi energi dan kalibrasi efisiensi. Kalibrasi energi diperlukan untuk tujuan analisis kualitatif, sedangkan kalibrasi efisiensi untuk tujuan analisis kuantitatif^[5]. Kalibrasi energi digunakan untuk mengetahui jenis radionuklida yang terdapat dalam cuplikan. Dari hasil kalibrasi energi menggunakan sumber standar didapat spektrum dengan nomor kanal (*channel*) tertentu, hubungan antara energi dengan nomor kanal dari sumber standar tersebut digunakan sebagai dasar untuk menentukan energi puncak spektrum sumber lain yang merupakan stimulasi cuplikan limbah resin. Dari posisi nomor kanal tertentu, dapat ditentukan energi dari puncak spektrum-spektrum yang terukur (tercacah) dan dapat diidentifikasi kandungan radionuklida dalam cuplikan limbah resin. Kalibrasi efisiensi digunakan untuk menghitung aktivitas sumber radioaktif yang terukur dalam limbah resin. Sumber radioaktif memancarkan radiasi ke segala arah, sedangkan cuplikan sumber radioaktif (limbah resin) diukur pada jarak tertentu dari detektor, sehingga hasil pencacahan belum mencerminkan aktivitas yang sesungguhnya dari sumber tersebut. Pada pengukuran secara spektrometri dimana pengukuran ditujukan kepada salah satu energi atau salah satu spektrum radionuklida dari sejumlah spektrum radionuklida yang terukur sehingga aktivitas radionuklida ditentukan oleh efisiensi deteksi dan intensitas mutlak dari energi sumber gamma yang sedang diukur. Perlakuan dan kondisi cuplikan saat pencacahan harus sama dengan saat kalibrasi.

METODE PENELITIAN

Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah Cuplikan limbah resin pakai. Tabung Marinelli, Nitrogen cair, dan Sumber Standar Eu-152, Co -60, serta Cs-137.

Alat

Alat yang digunakan adalah spektrometer gamma yang terdiri atas detektor semikonduktor (HP Ge), sumber tegangan tinggi (*High Voltage*), penguat awal (*preamplifier*), penguat (*amplifier*), penganalisis saluran ganda spektrum (*Multi Channel Analyzer*) dengan perangkat lunak program Maestro.

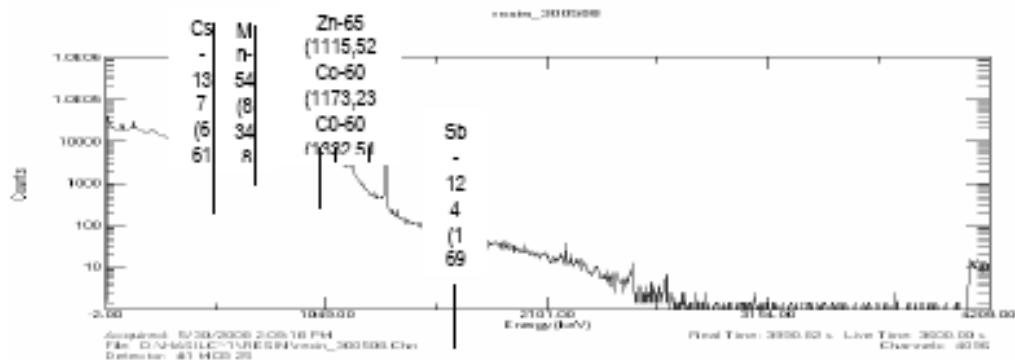
Cara Kerja

Penelitian dilakukan dengan cara sebagai berikut.

1. Cuplikan resin diambil secara acak dari tangki penampungan dan dikumpulkan di dalam wadah (karung dan ember)
2. Cuplikan resin dimasukkan ke dalam tabung-tabung marinelli untuk preparasi.
3. Sistem spektroskopi gamma dihidupkan untuk pemanasan agar kinerja sistem spektroskopi stabil
4. Sistem spektroskopi di kalibrasi energi dan dikalibrasi efisiensi menggunakan sumber standar Eu-152, Co60 dan Cs 137 berbentuk tabung marinelli.
5. Cuplikan limbah resin dalam tabung marinelli dilakukan pencacahan untuk mengetahui radionuklida yang terkandung dalam resin dan menghitung aktivitasnya.
6. Data spektrum pencacahan dicetak menggunakan printer dan disimpan ke dalam hard disk
7. Langkah 4 dan langkah 5 diulangi untuk cuplikan-cuplikan limbah resin yang lainnya

HASIL DAN PEMBAHASAN

Spektrum energi gamma hasil pengukuran yang terdeteksi dalam limbah resin dapat dilihat pada Gambar 3 dan nuklida-nuklida yang teridentifikasi dapat dilihat pada Tabel 1.



Gambar 3. Spektrum Energi Gamma Dari Radionuklida yang Terdeteksi Dalam Limbah Resin

Tabel 1. Nuklida-Nuklida yang Teridentifikasi Dalam Limbah Resin

No	Radionuklida Asal	Reaksi Nuklir	Radionuklida Hasil	Energi (keV)	Emisi	Umur Paroh
1	U ²³⁵	Fisi	Cs ¹³⁷	661,62	β,γ	30 y
2	Mn ⁵⁵	n,2n	Mn ⁵⁴	834,81	EC,γ	0,86 y
3	Zn ⁶⁴	n,γ	Zn ⁶⁵	1115,52	β,γ	244,1 d
4	Co ⁵⁹	n,γ	Co ⁶⁰	1173,23 1332,51	β,γ	5,3 y
5	Sn ¹²⁴	n,γ	Sb ¹²⁵	1691,04	β,γ	2,76 y

Aktivitas radionuklida dalam cuplikan dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Data-Data Analisis Cuplikan-Cuplikan Limbah Resin

Kode Cuplikan	Aktivitas Nuklida (Bq/liter)						Aktivitas Total (Bq/liter)
	Cs-137 661.62 keV	Mn-54 834.81 keV	Zn-65 1115.52 keV	Co-60 1173.23 keV	Co-60 1332.51 keV	Sb-124 1691.04 keV	
Resin 001	117.33975	560.74458	663.91131	49371.094	49615.712	15.056701	100343.8583
Resin 002	135.92822	521.71734	846.30063	40834.632	41218.324	17.260121	83574.16231
Resin 003	107.70822	527.37557	738.60577	15947.753	16051.78	10.649862	33383.87242
Resin 004	110.74384	436.69889	672.69368	14585.867	14658.121	12.486045	30476.61046
Resin 005	135.74084	557.80666	838.22795	18671.523	18771.053	19.463541	38993.81499
Resin 006	150.73155	525.70711	783.13857	18496.156	18923.445	16.892884	38896.07111
Resin 007	140.98759	519.83127	797.421	18286.805	18427.671	12.486045	38185.20191
Resin 008	146.04695	559.29376	821.28419	18764.208	19048.72	12.853282	39352.40618
Resin 009	150.84398	585.66253	861.20404	19332.678	19513.55	19.463541	40463.40209
Aktivitas rata-rata (Bq/liter)	132.896771	532.759746	780.309682	23810.07956	24025.3751	15.17911356	49296.59998
47835.45467							

PEMBAHASAN

Dari analisis kualitatif didapatkan (terukur) radionuklida Cs-137, Mn-54, Zn-65, Co-60, dan Sb-124. Radionuklida Mn-54, Zn 65, Co-60, dan Sb-124 dihasilkan dari korosi bahan struktur di dalam sistem pendingin primer yang teraktivasi dan terbawa air pendingin primer kemudian tertangkap oleh filter resin. Radionuklida tersebut sesuai dengan hasil analisis yang ada pada Laporan Analisis Kecelakaan (LAK) RSG-GAS Bab 12 Tabel X11-3, Tabel XII-5, dan Tabel XII-11 yang dapat dilihat pada lampiran^[3,7]. Nuklida Cs-137 dihasilkan dari produk fisi dari pengotor bahan bakar yang tidak dapat didekontaminasi selama proses produksi. Ditinjau dari jenis radiasinya (pancaran) radionuklida-radionuklida yang terkandung dalam limbah resin tersebut sebagian besar merupakan sumber gamma dan sumber sebagian kecil sumber beta. Paparan radiasi tetinggi pada permukaan (kontak) drum volume 100 liter sebesar 70 mR/Jam dan terendah 14 mR/Jam. Paparan pada jarak 1 m dari drum tertinggi sebesar 12 mR/Jam dan terendah 1mR/Jam.

Dari data analisis kualitatif tersebut aktivitas radionuklida yang terdeteksi antara cuplikan yang satu dengan yang lain tidak selalu sama, hal ini disebabkan oleh limbah resin yang terdapat dalam tangki penampungan sistem KBK 01 bersumber dari tiga sistem pemurnian yang berbeda yaitu sistem pemurnian air kolam reaktor KBE 01, sistem pemurnian lapisan air hangat KBE 02 dan sistem pemurnian kolam penyimpanan bahan bakar bekas FAK 01. Masing-masing sistem tersebut berfungsi untuk melakukan pemurnian air pendingin primer pada tempat sistem yang berbeda dan kemampuan memurnikan volume air berbeda walaupun antara air pada sistem yang satu dengan air pada sistem yang lain berhubungan sehingga kandungan radionuklida yang terdapat pada limbah resin antara cuplikan yang satu dengan cuplikan yang lain tidak sama.

Aktivitas radionuklida terbesar 47835.45467 Bq/liter yaitu sumber Co-60 dengan waktu paroh 5,3 tahun. Secara keseluruhan pada bulan Mei 2008 PRSG mengirimkan limbah resin sebanyak 7000 liter dengan aktivitas total sebesar 345076199.9 Bq ($345076199.9 \text{ Bq}/7000\text{liter} = 49296.59998$

Bq/liter atau $1,331008 \cdot 10^{-3} \text{ Ci/m}^3$). Nuklida dengan waktu paroh telama yaitu nuklida Cs-137 dengan waktu paroh 30 tahun. Dari Pengalaman Operasi sampai tahun 2008 RSG-GAS menimbulkan limbah resin sebanyak 875 liter/tahun^[6]. Berdasarkan informasi yang didapatkan dalam pelatihan pengelolaan limbah radioaktif, PTLR melakukan pengolahan limbah resin yang berasal dari PRSG dengan imobilisasi langsung yaitu dengan sementasi Shell beton berkapasitas 950 liter dengan demensi tinggi 130 cm dan diameter 100 cm. Dalam satu shell beton yang berkapasitas 950 liter limbah resin yang diisikan hanya sebesar sepertiga dari volume shell yaitu berkisar 320 liter. Duapertiga dari volume shell adalah *concrete* yaitu campuran semen dan pasir. Dengan volume resin 7000 liter yang telah dikirim ke PTLR akan didapat shell beton sebanyak 22 shell beton, yang akan menempati cukup banyak tempat penyimpanan limbah radioaktif di PTLR. Metode pengolahan limbah radioaktif limbah resin yang berasal dari PRSG dengan metode imobilisasi sementasi untuk dapat dievaluasi kembali mengingat tren di masa sekarang negara-negara maju dalam pengolahan limbah resin langsung melakukan kondisioning dengan menyimpan dalam tangki yang tahan puluhan tahun. Dikemudian hari, pada saat aktivitas limbah resin sudah rendah akan lebih mudah dalam pengolahannya dan lebih efisien ditinjau dari segi waktu dan biaya.

KESIMPULAN

Dari hasil analisis kualitatif dan kuantitatif limbah resin pada Mei tahun 2008 menggunakan spektrometer gamma dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Kandungan radionuklida dalam limbah resin telah sesuai dengan perkiraan radionuklida pada Laporan Analisis Kecelakaan RSG-GAS yaitu radionuklida Cs-137, Mn-54, Zn 65, Co-60, dan Sb-125 dengan rincian :
 - a. Mn-54, Zn 65, Co-60 dan Sb-125 dihasilkan dari hasil korosi bahan struktur
 - b. Cs-137 diakibatkan dari produk fisi dari pengotor bahan bakar yang tidak dapat didekontaminasi selama proses produksi.

2. Aktivitas total limbah resin yang dikirim pada Mei 2008 ke PTLR sebesar 345076199.9 Bq (345076199.9 Bq/7000liter = 49296.59998 Bq/liter atau $1,331008 \cdot 10^{-3} \text{ Ci/m}^3$) dan RSG-GAS menimbulkan limbah resin rata-rata sebanyak 875 liter/tahun

SARAN

Metode pengolahan limbah radioaktif limbah resin yang berasal dari PRSG dengan metode imobilisasi sementasi untuk dapat dievaluasi kembali mengingat tren di masa sekarang negara-negara maju dalam pengolahan limbah resin langsung melakukan kondisioning dengan menyimpan dalam tangki yang tahan puluhan tahun. Dikemudian hari, pada saat aktivitas limbah resin sudah rendah akan lebih mudah dalam pengolahannya dan lebih efisien ditinjau dari segi waktu dan biaya.

DAFTAR PUSTAKA

- ANONIMOUS, 1997, "Undang - Undang Ketenaganukliran No 10 tahun 1997".
- ANONIMOUS, 2007, Pusat Pendidikan Dan Latihan. "Pengelolaan Limbah Radioaktif Dan Aspek Keselamatannya", Pelatihan Proteksi Radiasi. PUSDIKLAT. BATAN.
- ANONIMOUS. 2007, Pusat Reaktor Serba Guna. "Laporan Analisis Keselamatan Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy revisi 9 PRSG Serpong",.
- DIYAH ERLINA LESTARI, 2006, "Keandalan Sistem Pemurnian Terhadap Kualitas Air Pendingin Primer Rsg-Gas", Proseding Seminar Keselamatan Nuklir 2006. Bapeten. 2-3 Agustus.
- WISNU SUSETYO, 1988, *Spektrometri Gamma Dan Penerapannya Dalam Analisis Pengaktifan Neutron*, Gadjah Mada University Press.
- SUDIYONO dan UNGGUL HARTOYO. 2006, "Evaluasi Penanganan Limbah di RSG-GAS. BULLETIN REAKTOR Volume III. Nomor 2", Oktober .
- MULYONO DARYOKO dan GUNANDJAR, 2003, "Inventarisasi Radionuklida Dalam Komponen Reaktor Nuklir". Jurnal Teknologi Pengelolaan Limbah. PTLR. Volume 6 Nomor 1 Juni.

Tabel L-1. Hasil Korosi Teraktivasi dari Bahan Struktur di Dalam Pendingin Primer^[3,7]

Radio Nuklida	Umur paruh	Sumber yang paling berpengaruh			Aktivitas (Ci/m^3)		Laju penglepasan pada cerobong
		A	B	Air dari dalam	Lapisan hangat	Balai reaktor	/ $\text{Ci}/\text{tahun}/$
Na-24	15 jam	X		2,4 (-3)*	1,5 (-3)*	1,3 (-11)*	1,5 (-5)*
Na-25	1 menit	X		7 (-9)	---	---**	---
Al-28	2,3 menit		X	1,5 (-3)	---	---	---
Mg-27	9,5 menit	X		5,0 (-5)	---	---	---
Cr-51	27,8 hari	X		1,0 (-3)	1,0 (-3)	---	9,6 (-6)
Mn-54	312,5 hari	X		6,8 (-7)	6,8 (-7)	---	6,8 (-9)
Mn-56	2,58 jam		X	1,5 (-5)	1,0 (-6)	---	1,5 (-7)
Co-58	70,8 hari	X		3,4 (-6)	3,4 (-6)	---	3,4 (-8)
Co-60	5,27 tahun	X		5,7 (-6)	5,7 (-6)	---	5,7 (-8)
Ni-65	2,56 jam		X	1,4 (-5)	9,3 (-7)	---	1,4 (-7)
Fe=59	44,6 hari	X		6,3 (-6)	6,3 (-6)	---	6,3 (-8)
	Jumlah			5,0 (-3) Ci/m^3	2,5 (-3) Ci/m^3	2,2 (-11) Ci/m^3	2,5 (-5) Ci/y

*) termasuk juga kandungan garam residu 0,5 ppm

***) $< 10^{-12} \text{ Ci}/\text{m}^3$

A = korosi aktif dengan pemurnian

B = korosi tidak aktif dengan pemurnian

Tabel XII-3. Konsentrasi Radionuklida yang Dilepaskan di Pendingin Primer (dalam Ci/m³)^[3,7]

Nuklida	Air Bagian Dalam	Lapisan Hangat (10 jam*)	Nuklida	Air Bagian Dalam	Lapisan Hangat (10 jam*)
	Halogenida			Gas mulia fisi	
I-128	2,52E-08**		Kr-83 m	7,15E-04	1,89E-05
I-131	4,04E-05	3,89E-05	Kr-85	7,67E-06	7,67E-06
I-132	1,83E-03	8,98E-05	Kr-85 m	1,74E-03	1,39E-04
I-133	7,36E-04	5,27E-04	Kr-87	3,39E-03	---
I-134	3,96E-03	1,44E-06	Kr-88	4,78E-03	4,01E-04
I-135	1,56E-03	5,57E-04	Kr-89	6,16E-03	---
I-136	3,17E-03		Kr-90	6,71E-03	---
Br-82	2,73E-09	2,25E-09	Xe-131	3,02E-03	2,95E-03
Br-83	2,25E-04	1,25E-05	Xe-133	8,56E-03	8,13E-03
Br-84	5,52E-04	1,25E-09	Xe-133 m	8,97E-03	7,87E-03
Sum	1,21E-02	1,23E-03	Xe-135	7,18E-03	6,96E-03
Hasil fisi volateli rendah			Xe-135 m	8,28E-03	
Sr-89	1,06E-05	1,05E-05	Xe-137	8,05E-03	
Sr-90	6,48E-08	6,48E-08	Xe-138	7,91E-03	
Y-90	2,34E-04	2,10E-04	Jumlah	8,78E-02	2,65E-02
Y-91	1,14E-05	1,13E-05			
Zr-95	1,07E-05	1,07E-05			
Nb-95	2,11E-05	2,10E-05			
Ru-103	6,05E-04	2,91E-04			
Rh-103 m	1,63E-03	1,09E-06			
Ru-106	1,25E-07	1,25E-07			
Rh-106	1,74E-04	7,45E-06			
Sn-125	1,52E-07	1,47E-07			
Sb-125	2,43E-09	2,43E-09			
Te-127 m	1,78E-07	1,77E-07			
Te-129 m	4,49E-06	4,45E-06			
Te-131 m	2,52E-04	2,00E-04			
Te-132	1,39E-04	1,27E-04			
Cs-137	6,46E-08	6,46E-08			
Ba-140	5,54E-04	5,42E-04			
La-140	3,92E-04	3,30E-04			
Ce-141	2,13E-05	2,11E-05			
Ce-144	2,16E-06	2,16E-06			
Pr-144	3,38E-03				
Nd-147	2,24E-05	2,18E-05			
Sm-151	1,55E-09	1,55E-09			
Jumlah	7,47E-03	1,81E-03			

Tabel XII-11. Konsentrasi Aktivitas di Dalam Sistem-Sistem, Dalam Ci/M^{3[3,7]}

Sistem	*)	**)	**)	**)	**)	*)	*)	*)	*)	*)
Nuklida	JE-01	KBE01	KBE02	FAK01	KBK01	KBB01	KTA01	KTF01	KPK01	KPK02
Co-60	5,70E-06	2,10E-01	3,90E-03	1,70E-03	2,10E-01	5,70E-06	5,70E-06	5,70E-06	2,30E-06	1,40E-05
S-35	0,00E+00	1,50E+01	2,80E-01	1,20E-01	3,80E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Eu-155	5,30E-09	2,20E-04	4,00E-06	1,70E-06	1,80E-04	5,30E-09	5,30E-09	5,30E-09	2,10E-09	1,10E-08
Sm-151	1,60E-09	6,10E-05	1,10E-06	4,80E-07	6,20E-05	1,60E-09	1,60E-09	1,60E-09	6,50E-10	3,40E-08
Nd-147	2,20E-05	1,40E-02	2,60E-04	1,10E-04	1,90E-07	2,20E-05	2,20E-05	2,20E-05	8,90E-06	7,80E-03
Pr-144	3,40E-03	8,00E-02	1,50E-03	6,30E-04	0,00E+00	3,40E-03	3,40E-03	3,40E-03	1,40E-03	1,80E+00
Ce-144	2,20E-06	1,20E-02	2,10E-04	9,30E-05	6,00E-03	2,20E-06	2,20E-06	2,20E-06	8,90E-07	1,80E+00
Ce-141	2,10E-05	1,70E-01	3,10E-03	1,30E-03	3,70E-03	2,10E-05	2,10E-05	2,10E-05	8,50E-06	1,80E-01
Ba/La-140	5,50E-04	4,60E-01	8,40E-03	3,70E-03	2,80E-05	5,50E-04	5,50E-04	5,50E-04	2,20E-04	1,10E-03
Cs-137	6,50E-08	2,60E-03	4,80E-05	2,10E-05	2,70E-03	6,50E-08	6,50E-08	6,50E-08	2,60E-08	1,00E-01
Cs-134	3,60E-08	1,50E-03	2,70E-05	1,20E-05	1,30E-03	3,60E-08	3,60E-08	3,60E-08	1,40E-08	5,80E-02
Te-132	1,40E-04	2,10E-01	3,90E-03	1,70E-03	0,00E+00	1,40E-04	1,40E-04	1,40E-04	5,60E-05	1,30E-05
Te-131m	2,50E-04	8,00E-02	1,50E-03	6,30E-04	0,00E+00	2,50E-04	2,50E-04	2,50E-04	1,00E-04	5,00E-04
Te-129m	4,50E-06	3,50E-02	6,50E-04	2,80E-04	9,30E-04	4,50E-06	4,50E-06	4,50E-06	1,80E-06	9,00E-06
Te-127m	1,80E-07	1,10E-04	2,00E-06	8,60E-07	3,50E-05	1,80E-07	1,80E-07	1,80E-07	7,30E-08	1,50E-02
Sb-125	2,40E-09	9,00E-04	1,70E-05	7,20E-06	8,20E-04	2,40E-09	2,40E-09	2,40E-09	9,70E-10	5,00E-03
Sn-125	1,50E-07	9,80E-03	1,80E-04	7,70E-05	1,00E-08	1,50E-07	1,50E-07	1,50E-07	6,00E-08	3,00E-07
Rh-106m	1,70E-04	4,60E-04	8,40E-06	3,60E-06	0,00E+00	1,70E-04	1,70E-04	1,70E-04	6,90E-05	3,40E-04
Ru-106	1,30E-07	4,10E-03	7,60E-05	3,30E-05	3,00E-03	1,30E-07	1,30E-07	1,30E-07	5,20E-08	2,60E-07
Rh-103m	1,60E-03	2,10E-01	3,90E-03	1,70E-03	0,00E+00	1,60E-03	1,60E-03	1,60E-03	6,50E-04	5,00E-02
Ru-103	6,10E-04	4,90E-01	8,60E-03	3,90E-03	2,10E-02	6,10E-04	6,10E-04	6,10E-04	2,50E-04	2,10E-01
Nb-95	2,10E-05	9,30E-02	1,70E-03	7,40E-03	2,10E-02	2,10E-05	2,10E-05	2,10E-05	8,50E-06	2,30E+00
Zr-95	1,10E-05	9,30E-02	1,70E-03	7,40E-03	2,90E-02	1,10E-05	1,10E-05	1,10E-05	4,40E-06	1,30E+00
Y91	1,10E-05	1,70E-01	3,20E-03	1,40E-03	2,20E-02	1,10E-05	1,10E-05	1,10E-05	4,40E-06	9,20E-01
Y90	2,30E-04	4,40E-02	8,10E-04	3,50E-04	0,00E+00	2,30E-04	2,30E-04	2,30E-04	9,30E-05	1,00E-01
Sr-90	6,50E-08	2,50E-03	4,70E-05	2,00E-05	2,60E-03	6,50E-08	6,50E-08	6,50E-08	2,60E-08	1,30E-07
Sr-89	1,10E-05	1,40E-01	2,60E-03	1,10E-03	1,20E-02	1,10E-05	1,10E-05	1,10E-05	4,40E-06	2,40E-05
Fe-59	6,30E-06	1,10E-02	2,00E-04	8,70E-05	6,90E-04	6,30E-06	6,30E-06	6,30E-06	2,50E-06	1,30E-05
Ni-65	1,40E-05	1,60E-02	2,90E-04	1,20E-04	0,00E+00	1,40E-05	1,40E-05	1,40E-05	5,60E-06	2,80E-05
Co-58	3,40E-06	1,20E-03	2,30E-05	9,80E-06	2,20E-04	3,40E-06	3,40E-06	3,40E-06	1,40E-06	6,80E-06
Mn-56	1,50E-05	3,90E-03	7,20E-05	3,10E-05	0,00E+00	1,50E-05	1,50E-05	1,50E-05	6,00E-06	3,00E-05
Mn-54	6,80E-07	2,30E-02	4,20E-04	1,60E-04	1,60E-02	6,80E-07	6,80E-07	6,80E-07	2,70E-07	1,40E-06
Cr-51	1,00E-03	6,20E-04	1,10E-05	4,90E-06	7,10E-06	1,00E-03	1,00E-03	1,00E-03	4,00E-04	2,00E-03
Mg-27	5,00E-05	2,60E-03	4,80E-05	2,10E-05	0,00E+00	5,00E-05	5,00E-05	5,00E-05	2,00E-05	1,00E-04
Al-28	1,50E-03	4,90E-09	9,00E-11	3,90E-11	0,00E+00	1,50E-03	1,50E-03	1,50E-03	6,00E-04	3,00E-03
Na-24	2,40E-03	1,00E+00	1,80E-02	7,90E-03	0,00E+00	2,40E-03	2,40E-03	2,40E-03	9,70E-04	4,80E-03
Ci/m ³	1,20E-02	1,86E+01	3,45E-01	1,62E-01	4,15E+00	1,20E-02	1,20E-02	1,20E-02	4,89E-03	8,86E+00

*) Air

**) Resin filter *mixed-bed* pada saat pengeluran.

Keterangan:

JE-01 Sistem pendingin primer KBB01 Sistem drainase kolam

KBE01 Sistem pemurnian primer KTA01 Sistem drainase komponen primer

KBE02 Sistem pemurnian lapisan air hangat KTF01 Sistem drainase gedung

FAK01 Sistem pemurnian kolam penyimpan KPK01 Sistem penampung air limbah aktivitas rendah

KBK01 Sistem pembuangan limbah resin

KPK02 Sistem penampung air limbah aktivitas tinggi.

