

ANALISIS KUANTITATIF *SOURCE-TERM* RSG-GAS PADA OPERASI DAYA 15 MW

Jaja Sukmana, Jonnie Albert Korua, Sinisius Suwarto

ABSTRAK

ANALISIS KUANTITATIF *SOURCE-TERM* RSG-GAS PADA OPERASI DAYA 15 MW. Telah dilakukan analisis kuantitatif *source-term* RSG-GAS yang berbahan bakar U_3Si_2 -Al pada daya 15 WM. Analisis ini perlu dilakukan untuk membuktikan bahwa persyaratan proteksi radiasi yaitu dicapainya ALARA tetap terjaga dan dijamin selama reaktor dioperasikan. Analisis dilakukan dengan mendata komponen penyusun teras reaktor dan menghitung produk fisi, produk aktivasi dan aktinida yang timbul selama reaktor dioperasikan. Dari hasil perhitungan radioaktivitas diperoleh radionuklida hasil fisi Uranium diantaranya adalah Sr-89, Sr-90, Y-91, Nb-97, Xe-133, I-133, Cs-137, Cs-138, Pr-145, dan Ce-144. Parameter yang digunakan untuk perhitungan adalah daya thermal reaktor P , *yield* y_i , lama operasi t , dan waktu paro $T_{1/2}$. Dari analisis menunjukkan bahwa *source-term* beraktivitas besar ditimbulkan karena lama operasi dan waktu paro radionuklidanya. Sistem keselamatan nuklir yang berkaitan dengan keselamatan instalasi, proteksi radiasi, dan keselamatan reaktor telah diterapkan pada fasilitas RSG-GAS sehingga tidak pernah terindikasi adanya *source-term* lepas ke lingkungan.

Kata kunci: *source-term*, radionuklida, keselamatan

ABSTRACT

QUANTITATIVE ANALYSIS OF *SOURCE-TERM* OF THE RSG-GAS AT POWER OPERATION OF 15 MW. The quantitative analysis of *source-term* of RSG-GAS with U_3Si_2 -Al fuels at power operation 15 WM has been done. This analysis is carried out to prove that radiation protection requirement of ALARA is ensured and maintained during reactor operation. The analysis conducted by managing of reactor core components data and calculating to fissile product, activation product and of aktinide arising during reactor operation. This analysis showed nuclides fission product from the uranium are Sr-89, Sr-90, Y-91, Nb-97, Xe-133, I-133, Cs-137, Cs-138, Pr-145, and Ce-144. The parameters used for calculations are reactor power P , yield y_i , operation duration time t , and half life $T_{1/2}$. The *source-term* with high activities are generated by operation duration time and its half life. Nuclear safety system related to installation, radiation protection, and reactor has been applied in RSG-GAS, so that the *source-term* release to environment has never been indicated.

Keywords : *source-term*, radionuclide, safety.

^{*)}Fungsional Pranata Nuklir PRSG-BATAN

1. PENDAHULUAN

Berdasar kepada keputusan Kepala Bapeten N0.05/Ka-BAPETEN/V-99 tentang Ketentuan Keselamatan Desain Reaktor Penelitian, Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy (RSG-GAS) telah mematuhi dan melaksanakan persyaratan yang disebutkan di dalam keputusan tersebut dan direfleksikan di dalam dokumen "Laporan Analisis Keselamatan" (LAK) RSG-GAS. Salah satu persyaratan yang harus dipenuhi adalah ketentuan proteksi radiasi. Prinsip *ALARA: As low as reasonably achievable* harus dijaga dan dijamin pencapaiannya. Aktivitas radiasi yang dihasilkan dari produk fisi elemen bakar di teras reaktor dijaga dan dikendalikan agar dosis yang diterima oleh personil pengoperasi atau masyarakat umum serendah mungkin.

Radionuklida-radionuklida hasil fisi (*source-term*) secara alami terakumulasi dalam elemen bakar di teras reaktor dan menjadi sumber radiasi primer di reaktor. Begitupun juga produk aktivasi hasil tangkapan neutron ke bahan penyusun kelongsong elemen bakar dan bahan penyusun teras reaktor akan memberikan tambahan aktivitas radiasi.

Setelah lebih dari 20 tahun RSG-GAS beroperasi, prakiraan besar aktivitas radiasi yang terakumulasi di teras reaktor perlu dihitung. Kondisi dan metode pengungkungan terhadap aktivitas *source-term* perlu secara cermat ditentukan, mengingat desain bahan bakar, pendinginan, dan sistem ventilasi RSG-GAS secara keseluruhan merupakan sistem penghalang keluarnya produk fisi ke lingkungan. Meskipun peralatan penunjang keselamatan atau alat pengendali radioaktivitas telah banyak dibahas oleh para ahli keselamatan radiasi, karakteristik dari radionuklida hasil fisi dalam kondisi sebenarnya harus didata dan diawasi selama reaktor beroperasi secara terus-menerus.

Perhitungan yang akan dilakukan adalah menentukan besaran radioaktivitas dari masing-masing *source-term* berdasar pada besar daya terbangkit dan lama operasi reaktor. Sehingga tujuan penulisan makalah ini adalah untuk menganalisis secara kuantitatif *source-term* selama reaktor dioperasikan, keberadaannya, dan jalur yang dilalui bila terjadi kebocoran/lepasan. Diharapkan terakhir adalah supaya hasil evaluasi dari perhitungan ini dapat mendukung operasi RSG-GAS agar tetap aman dan selamat.

2. TEORI

Source-term adalah suatu ungkapan yang digunakan untuk menandakan informasi tentang pelepasan bahan radioaktif hasil fisi atau potensi dari sumber yang telah ditentukan, yang boleh meliputi spesifikasi mengenai komposisi, jumlah, rata-rata, dan mode pelepasan^[1].

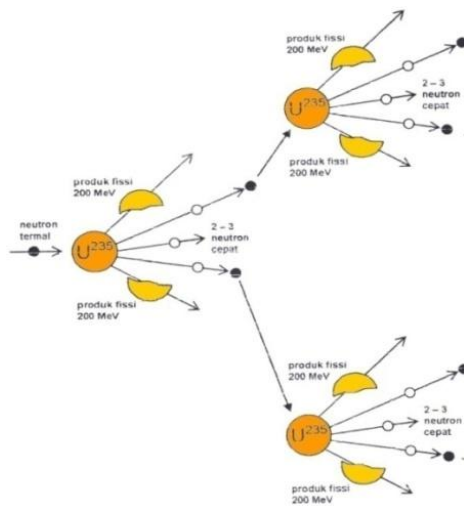
Sejumlah radionuklida dan bahan radioaktif lain yang dilepaskan tergantung pada situasi fisi, sejarah operasi, dan sistem lain-lain dalam reaktor nuklir. Radionuklida dengan waktu-paro yang lebih pendek meluruh dengan cepat dengan berlalunya waktu selama operasi berikutnya atau ketika tidak operasi.

Sumber radiasi di reaktor umumnya berawal dari reaksi fisi elemen bakar reaktor. Reaksi fisi yang seterusnya menjadi reaksi berantai terkendali, dua diantaranya menghasilkan neutron dan radiasi foton gamma, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 1. Evaluasi terhadap probabilitas dan jenis *source term* dapat disesuaikan dengan perangkat dan sistem reaktor itu sendiri.

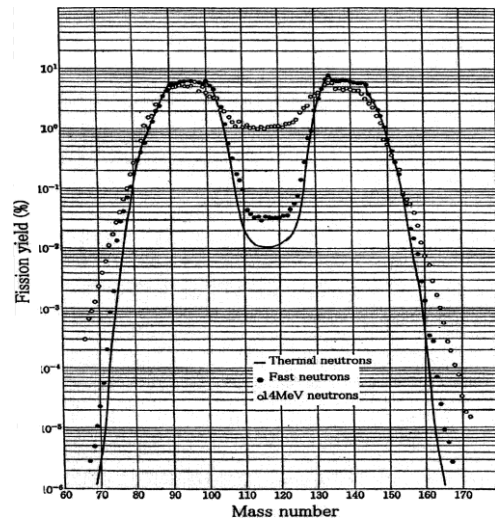
Pada Gambar 2 ditunjukkan radionuklida hasil fisi berdasar nomor massa terhadap kebolehdijadian pembelahan (*fission yield*). U-235 sebagai bahan fisi bila berada di teras akan diasumsikan berubah menjadi dua radionuklida lain. Kedua radionuklida tersebut bila nomor

massanya dijumlahkan akan sama dengan 235. Sehingga dari gambar tersebut radionuklida hasil fisi selalu berpasangan. Pembelahan itu sendiri dapat diakibatkan oleh neutron cepat, neutron epithermal, dan neutron thermal.

Neutron thermal dan epithermal serta foton gamma juga mengiradiasi radionuklida di sekitarnya sehingga menimbulkan zat radioaktif yang juga memancarkan radiasi atau meluruh sesuai karakterisasi radionuklida yang terbentuk (sudah terbahas pada Pustaka 3). Konsentrasi aktivitas radionuklida di teras dan lepasannya berdasar sejarah operasi dapat dihitung dan tampilan data diperoleh dari *out-put* program Origen^[2].



Gambar 1. Skema reaksi fisi berantai



Gambar 2. Sebaran *source-term* berdasar *yield*

Daya *thermal* $P_{(t)}$ yang dihasilkan di reaktor atau pada beberapa bagian elemen bakar (sebagai fungsi waktu) setiap pembelahan mendekati 195 MeV. Rata-rata pembelahan per MW_{th} disebut sebagai faktor fisi (k). Dimana, k mempunyai nilai:

$$k = 10^6 \text{ [J/s]} : (195 \times 10^6 \times 1,6 \times 10^{-19} \text{ [J/fissi]}) = 3,2 \times 10^{16} \text{ fissi/s per } MW_{th}$$

Dengan daya *thermal* reaktor yang dibangkitkan maka jumlah radionuklida yang dihasilkan sebagai fungsi waktu dapat ditentukan dari persamaan:

$$\frac{dN_{ci}}{dt} = kP_{(t)}Y_i - \gamma_i N_{ci}$$

jika P_t konstan maka

$$N_{ci}(t) = \frac{kPY_i}{\gamma_i} (1 - e^{-\gamma_i t})$$

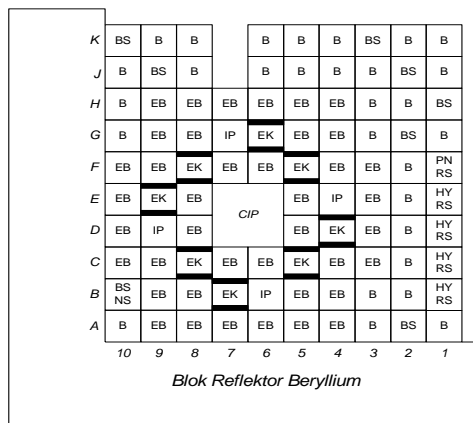
Sehingga besarnya radioaktivitas¹⁾ dari radionuklida hasil fisi dihitung sebagai:

$$R_i(t) = \gamma_i N_{ci}(t) = kPY_i(1 - e^{-\gamma_i t})$$

dimana:

- R_i = Radioaktivitas
- k = faktor fisi
- P = Daya thermal
- Y_i = yield
- $\gamma_i = \ln 2 : T \frac{1}{2}$
- t = waktu/durasi operasi

Perhitungan aktivitas radiasi *source-term* RSG-GAS berdasarkan daya dan lama operasi reaktor. Operasi reaktor berkenaan dengan keberadaan elemen bakar di teras adalah satu siklus operasi. Di RSG-GAS untuk setiap operasi satu siklus digunakan pola pergantian elemen bakar 5+1. Sebanyak 5 elemen bakar (EB) dan 1 elemen kendali (EK) dikeluarkan dari teras dan dimasukkan yang segar/baru. Jumlah elemen bakar dan elemen kendali di teras masing-masing adalah 40 EB dan 8 EK dengan total massa Uranium di awal siklus rata-rata 11.407 gram^[3]. Skema konfigurasi teras RSG-GAS ditunjukkan pada Gambar 3. Dengan pola tersebut secara tidak langsung pembakaran Uranium di teras telah dibatasi dan menurut SAR (*safety analysis report*) fraksi bakar maksimal EB di RSG-GAS adalah 60%. Pola pergantian ini juga kemungkinan dapat mempengaruhi kuantitas *source-term* di teras.



Gambar 3. Konfigurasi teras RSG-GAS

Source-term RSG-GAS telah disajikan dalam LAK dan terkendali, baik secara desain material atau secara teknis dengan sistem keselamatan berlapis. Semua peralatan-peralatan pengungku reaktor, sistem ventilasi, dan perisai biologi yang mengelilingi teras reaktor serta sistem lapisan air hangat reaktor dan tangki tunda ditujukan agar paparan operasional serendah mungkin. Jika tidak terjadi pelelehan atau kebocoran elemen bakar (EB) di teras maka *source-term* sesungguhnya tetap berada pada EB dengan kelongsongnya. Bila dihasilkan aktivitas meningkat yang terbawa aliran pendingin primer maka lepasan tersebut segera diketahui dengan pemantau FFD (*fuel failure detector*).

3. METODOLOGI

Metode dalam pelaksanaan analisis kuantitatif *source-term* ini meliputi:

Tahap pertama:

Penyusunan dan pemeriksaan data mengenai:

- komponen dan material teras RSG-GAS.
- data inisial *output* untuk paket program ORIGEN yang berada dalam LAK RSG-GAS.

Tahap kedua:

Perhitungan dan evaluasi data dari:

- perhitungan rata-rata waktu dan daya operasi
- perhitungan aktivitas masing-masing *source-term*

Tahap terakhir:

Menampilkan data *source-term* hasil perhitungan manual, memberikan evaluasi perbandingan terhadap kejadian, dan saran dari segi keselamatan serta memberikan kesimpulan yang mendukung perlu berkembangnya *inventory source-term* dengan mengutamakan keselamatan.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

RSG-GAS berkemampuan membangkitkan daya 30 MW namun untuk efisiensi maka dioperasikan pada daya 15 MW. Untuk melakukan perhitungan radioaktivitas hasil fisi maka waktu t operasi atau keberadaan elemen bakar di teras harus dihitung. Berikut dihasilkan data operasi reaktor yang dirangkum mulai teras 61 hingga teras 70.

Tabel 1. Data Operasi 15 MW RSG-GAS (teras 61 s/d teras 70)

TERAS	Periode Operasi	Energi (MWD)	t operasi (jam)
61	10/05/07-28/08/07	682,0	1.091,20
62	29/08/07-18/12/07	658,2	1.053,12
63	19/12/07-25/03/08	657,9	1.052,64
64	26/03/08-01/07/08	638,3	1.021,28
65	02/07/08-28/10/08	664,5	1.063,20
66	29/10/08-18/02/09	645,1	1.032,16
67	19/02/09-26/05/09	659,3	1.054,88
68	27/05/09-01/09/09	650,3	1.040,48
69	02/09/09-16/12/09	656,2	1.049,92
70	17/12/09-22/03/09	651,8	1.042,88
Rata-rata		656,36	1.050,18
Total durasi 8 teras rata-rata = 8.401,44 jam			

Satu teras operasi ditempuh dalam waktu rata-rata 1050,18 jam. Sedangkan pola pergantian EB-EK atau keberadaan elemen bakar dari mulai masuk teras sampai diangkat kembali menempuh 8 teras operasi. Sehingga waktu operasi t setiap elemen bakar (Uranium) di teras menjadi 8 kali dan rata-rata waktu operasi, yaitu 8.401,44 jam.

Dengan menggunakan perhitungan radioaktivitas R , dengan :

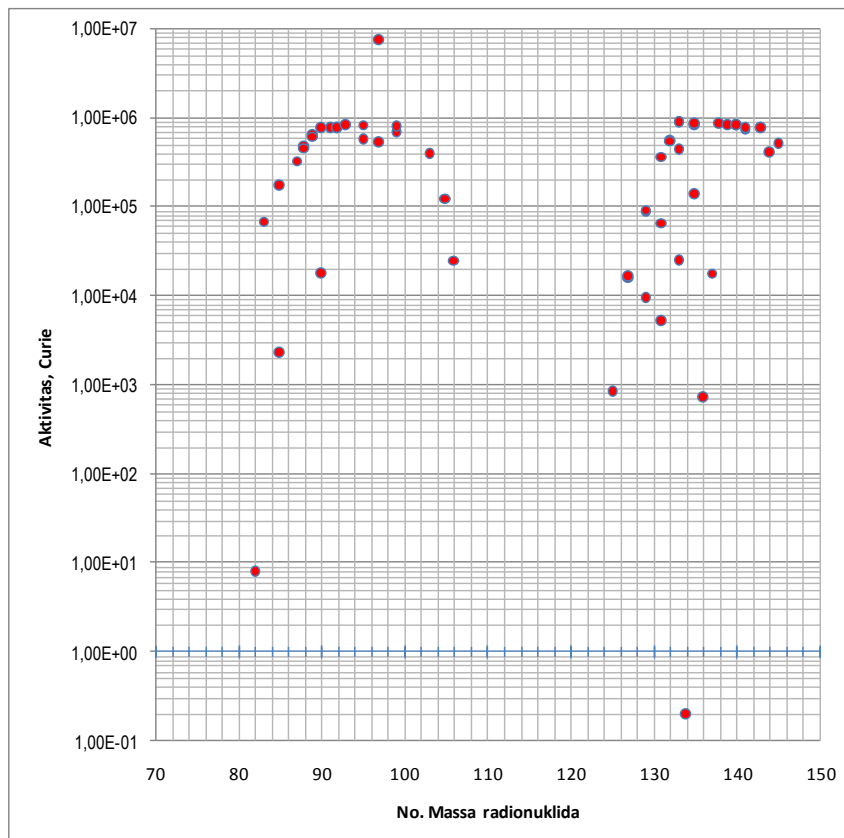
$$k = 3,20e+16 \text{ fisi/s per MW}$$

$$P = 15 \text{ MW}$$

$$t = 8.401,44 \text{ jam}$$

y_i dan $T_{1/2}$ sesuai Pustaka 1

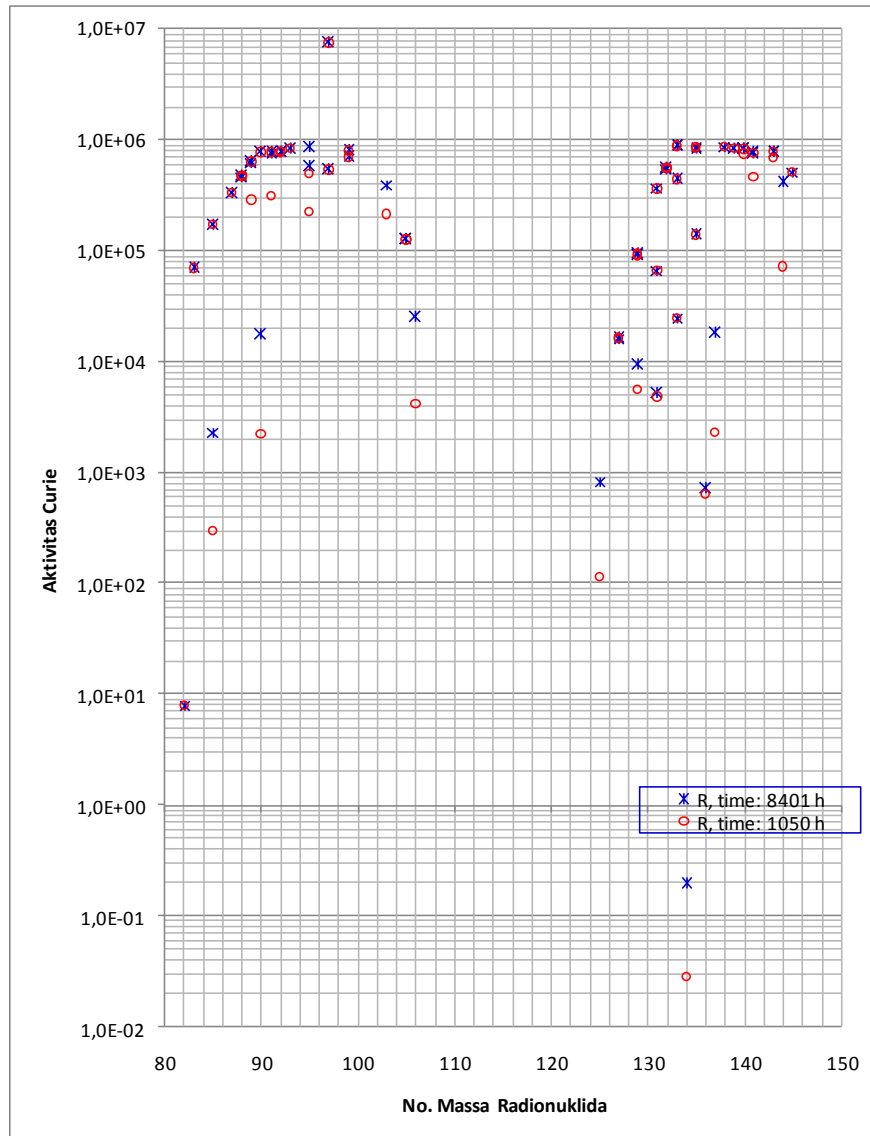
Maka diperoleh data jumlah aktivitas setiap radionuklida seperti yang disajikan pada Lampiran 1. Sebaran radioaktivitas *source-term* hasil perhitungan ini, ditampilkan dalam grafik sebagai berikut:



Gambar 4. Sebaran radioaktivitas *source-term* selama operasi normal di elemen bakar RSG-GAS (daya $P=15$ MW)

Dari Gambar 4, teramati bahwa *source-term* reaktor timbul berkelompok dalam pasangan yaitu kelompok nomor massa 80-110 dengan kelompok nomor massa 125-145. Aktivitas tertinggi ditimbulkan oleh radionuklida Niobium (Nb-97)

dengan $R = 7,5e+6$ Ci. Untuk dapat menganalisis lebih baik, berikut ini disajikan grafik dan tabel-tabel yang berkenaan dengan karakteristik *source-term*.



Gambar 5. Sebaran *source-term* selama satu siklus dan delapan siklus operasi di elemen bakar RSG-GAS ($P = 15$ MW)

Dari Gambar 5 yang merupakan perpaduan aktivitas dengan lama operasi 1 siklus atau 1050 jam dengan lama operasi 8 siklus atau 8401 jam teramati bahwa kecenderungan aktivitas R lebih tinggi dengan waktu operasi t lebih lama. Aktivitas yang meningkat dengan

penambahan waktu operasi ditimbulkan rata-rata oleh radionuklida yang waktu paronya tinggi. Radionuklida *source-term* dengan waktu paro lebih dari 50 hari ditampilkan pada Tabel 2. Sedangkan radionuklida dengan waktu paro pendek cenderung aktivitasnya tetap akan tetapi

beberapa saat setelah tidak operasi aktivitasnya meluruh mengikuti hukum peluruhan. *Source-term* berumur pendek

($T_{1/2}$ kurang dari 1 jam), diantaranya adalah Rb-89, Xe-135m, Rb-88, Cs138, dan Te-133m.

Tabel 2. *Source-term* berdasar waktu paro $T_{1/2}$ besar (lebih dari 50 d)

Rarionuklida	y_i	$T_{1/2}$		R Ci (8 siklus)
Sr-89	4,85E-02	50,5	d	6,2341E+05
Y-91	5,92E-02	58,51	d	7,5509E+05
Zr-95	4,50E-02	64	d	5,7003E+05
Ce-144	5,47E-02	284,3	d	4,0691E+05
Ru-106	4,02E-03	368	d	2,5151E+04
Cs-134	5,39E-08	2,06	y	1,9490E-01
Sb-125	2,94E-04	2,77	y	8,2279E+02
Kr-85	2,90E-03	10,7	y	2,2940E+03
Sr-90	5,90E-02	29,1	y	1,7503E+04
Cs-137	6,27E-02	30	y	1,8049E+04

Catatan:
d: day
y: year

Source-term dengan waktu-paro besar yang menimbulkan aktivitas tinggi dan sangat penting untuk diperhatikan adalah Caesium (Cs-137) dan Strontium (Sr-90) untuk periode tahunan dan Yttrium (Y-91) dan Strontium (Sr-89) untuk periode bulanan.

Tabel 3. *Source-term* berdasar yield y_i besar (lebih dari $6e-2$)

Rarionuklida	y_i	$T_{1/2}$		R Ci (8 siklus)
Mo-99	6,11E-02	66	h	7,9186E+05
Cs-137	6,27E-02	30	y	1,8049E+04
Ba-140	6,29E-02	12,75	d	8,1518E+05
La-140	6,30E-02	40,27	h	8,1648E+05
Ba-139	6,35E-02	82,7	m	8,2296E+05
Y-93	6,39E-02	10,1	h	8,2814E+05
I-135	6,41E-02	6,61	h	8,3074E+05
Nb-95	6,49E-02	35,2	d	8,4025E+05
Xe-135	6,63E-02	9,09	h	8,5925E+05
Cs-138	6,65E-02	32,2	m	8,6184E+05
I-133	6,77E-02	20,8	h	8,7739E+05
Xe-133	6,77E-02	5,25	d	8,7739E+05
Nb-97	5,76E-01	72,1	m	7,4650E+06

Catatan:
m: menit
h: hour
d: day
y: year

Sedangkan *source-term* yang lebih memungkinkan sering muncul (dominan) karena y_i besar adalah Niobium (Nb-97), Xenon (Xe-133), dan Iodine (I-133) tetapi dalam periode harian. Terutama Niobium-97 memberikan aktivitas lebih besar karena kebolehdjian bereaksi dengan neutron paling tinggi.

Tabel 4. *Source-term* berdasar Aktivitas besar (lebih dari $8e+5$ Ci)

Radionuklida	y_i	$T_{1/2}$		R Ci (8 siklus)
Ba-140	6,29E-02	12,75	d	8,1518E+05
La-140	6,30E-02	40,27	h	8,1648E+05
Ba-139	6,35E-02	82,7	m	8,2296E+05
Y-93	6,39E-02	10,1	h	8,2814E+05
I-135	6,41E-02	6,61	h	8,3074E+05
Nb-95	6,49E-02	35,2	d	8,4025E+05
Xe-135	6,63E-02	9,09	h	8,5925E+05
Cs-138	6,65E-02	32,2	m	8,6184E+05
I-133	6,77E-02	20,8	h	8,7739E+05
Xe-133	6,77E-02	5,25	d	8,7739E+05
Nb-97	5,76E-01	72,1	m	7,4650E+06

Catatan:
m: menit
h: hour
d: day

Pada Tabel 4 ditampilkan *source-term* dengan aktivitasnya rata-rata tinggi, diantaranya yaitu Niobium (Nb-97), Xenon (Xe-133), Iodine (I-133), dan Caesium (Cs-138).

Tabel 5. *Source-term* berdasar kecenderungan timbul berpasangan (anak luruh Uranium)

Radionuklid a	y_i	$T_{1/2}$		R Ci (8 siklus)	Radionuklida	y_i	$T_{1/2}$		R Ci (8 siklus)
Y-90	5,90E-02	64,00	h	7,6464E+05	Pr-145	3,92E-02	5,98	h	5,0803E+05
Sr-90	5,90E-02	29,10	y	1,7503E+04					
Sr-91	5,92E-02	9,50	h	7,6723E+05	Ce-144	5,47E-02	284,30	d	4,0691E+05
Y-91	5,92E-02	58,51	d	7,5509E+05					
Sr-92	5,91E-02	2,71	h	7,6594E+05	Ce-143	5,94E-02	33,00	h	7,6982E+05
Y-92	5,96E-02	3,54	h	7,7242E+05	Pr-143	5,94E-02	13,58	d	7,6982E+05
Nb-95	6,49E-02	35,20	d	8,4025E+05	La-140	6,30E-02	40,27	h	8,1648E+05
Zr-95	4,50E-02	64,00	d	5,7003E+05	Ba-140	6,29E-02	12,75	d	8,1518E+05
Nb-97	5,76E-01	72,10	m	7,4650E+06	Cs-138	6,65E-02	32,20	m	8,6184E+05
Zr-97	4,10E-02	16,90	h	5,3136E+05					
Tc-99m	5,32E-02	6,02	h	6,8947E+05	Cs-136	5,47E-05	13,16	d	7,0891E+02
Mo-99	6,11E-02	66,00	h	7,9186E+05					
Ru-103	3,03E-02	39,30	d	3,9187E+05	Y-132	4,21E-02	2,30	h	5,4562E+05
					Te-132	4,28E-02	78,20	h	5,5469E+05
Ru-106	4,02E-03	368,00	d	2,5151E+04	Te-129	6,93E-03	69,60	m	8,9813E+04
					Tb-129	7,13E-03	4,41	h	9,2405E+04
					Te-129m	7,20E-04	33,60	d	9,3244E+03

Tabel 5, ini menampilkan kecenderungan *source-term* yang diperhitungkan karena muncul bersamaan. Secara teori Uranium akan terbelah dua

menghasilkan radionuklida sepasang dan seterusnya. Maka jika terdeteksi suatu radionuklida anak luruh Uranium

dipastikan pasangan lainnya ada dengan aktivitas, y_i , dan $T_{1/2}$ berbeda-beda.

Dari penyajian grafik dan tabel di atas, *source-term* RSG-GAS sebagai hasil perhitungan dengan parameter daya P , *yield* y_i , lama operasi t , dan waktu paro $T_{1/2}$ yang harus mendapat perhatian dan analisis adalah Sr-89, Sr-90, Y-91, Nb-97, Xe-133, I-133, Cs-137, Cs-138, dan beberapa pasangannya diantaranya Pr-145, Ce-144.

Fraksi radionuklida umur panjang di dalam air sangat bergantung pada kondisi operasi yang berkaitan (pemurnian). Namun demikian konsentrasi radionuklida tersebut di dalam pendingin primer terhitung rendah (10^{-3} - 10^{-4} Ci/m³). Radionuklida yang terpantau di Balai Reaktor dari jenis halogenida dan gas mulia juga terukur beraktivitas cukup rendah, yaitu $6e-6$ Ci/m³, Pustaka 2. Ini menunjukkan bahwa *source-term* reaktor tidak lepas/bocor dalam sistem pendingin.

Sedangkan batas pengaktifan sistem isolasi pengungkung yang didesain untuk memulai pengungkungan jika terjadi aktivitas tinggi yang tidak diperkirakan di dalam reaktor (sebagai contoh pada Balai Operasi, Balai Eksperimen, fasilitas pendukung, dan *Primary Cell*) adalah maksimal 5×10^{-4} Ci/m³ ($18,5 \times 10^6$ Bq/m³). Menurut Pustaka 5, kejadian isolasi gedung akibat aktivitas melebihi nilai tersebut hanya terjadi sekali dan sesaat yang diakibatkan karena adanya pengeluaran sampel melalui sistem Rabbit (bukan karena lepasan *source-term*).

Sumber gamma yang timbul serentak dari fisi dan proses penangkapan neutron serta proses peluruhan produk fisi disebut sebagai gamma primer. Radiasi gamma ini diantisipasi dengan air kolam, perisai biologis, dan sistem pendingin primer yang diperpanjang waktu alirannya dengan menempatkan tangki tunda sebelum menempatkan pompa pendingin. Gas radioaktif, gas mulia, halogenida, dan aerosol radioaktif sebelum dibuang ke cerobong terlebih

dahulu mendapat hambatan, misalnya dengan sistem pemurnian air kolam, lapisan air hangat, dan filter-filter dalam sistem ventilasi.

Sumber radiasi yang sangat potensial ini, terkendali dan selalu berada di elemen bakar/element kendali dengan bagian kelongsongnya. Pergantian dan pengangkatan elemen bakar habis pakai melalui jalur aman dan bershielding. Pergantian sumber *source-term* ini tidak berdampak akumulasi radioaktivitas karena maksimal 8 teras atau 2 tahunan keberadaannya di teras. Pembuktian tidak adanya lepasan *source-term* adalah dengan hasil pelaksanaan pemantauan lingkungan di sekitar RSG-GAS sejak dioperasikan 1987 hingga sekarang. Bahwa tidak terjadi peningkatan penerimaan dosis oleh anggota masyarakat yang berada di sekitar RSG-GAS LP^[6].

5. KESIMPULAN

Analisis kuantitatif *source-term* di reaktor nuklir berasal dari elemen bakar di teras reaktor. Secara kuantitatif besaran radioaktivitas *source-term* bergantung pada parameter daya, dan waktu operasi serta karakteristik radionuklidanya, yaitu kebolehjadian berinteraksi dengan neutron dan waktu-paro. Radionuklida yang harus mendapat perhatian dan pengawasan dari hasil perhitungan adalah Sr-89, Sr-90, Y-91, Nb-97, Xe-133, I-133, Cs-137, Cs-138, dan Pr-145 serta Ce-144. Aktivitas radioaktif hasil fisi di RSG-GAS berada di elemen bakar yang terlindungi dengan kelongsong, teras aktif, sistem pendingin reaktor, dinding reaktor, udara di reaktor, sistem ventilasi, dan gedung reaktor. Sistem pergantian elemen bakar setiap teras tidak memungkinkan akumulasi *source-term* di reaktor. Sedangkan unsur radioaktif berupa radionuklida yang lepas di antaranya gas mulia dan golongan halogenida, berasal dari aktivasi aerosol dalam sistem pendingin dan kontaminasi

kelongsong. Namun demikian keselamatan dengan sistem berlapis dan kemampuan mengisolasi diri maka paparan operasional di RSG-GAS terjaga tetap rendah.

PUSTAKA

1. **SHINICHI SUGA**, *Pathway and Assessment, JAEA-Batan Joint Training Course on Radiological emergency preparedness and response*, Jakarta, 2008.
2. **JAJA SUKMANA, DKK.**, Identifikasi *source-term* RSG-GAS untuk keselamatan operasional, Seminar Nasional IV, STTN, Yogyakarta, 2008.
3. **JAJA SUKMANA, DKK.**, Validasi perhitungan manual fraksi bakar teras operasi ke-66 dengan menggunakan program Batan-2Diff, Reaktor-Buletin pengelolaan reaktor nuklir Vol VII, PRSG, 2010.
4. **PRSG-BATAN**, Laporan Analisis Keselamatan (LAK) RSG-GAS, Revisi 10, Serpong 2008.
5. **JAJA SUKMANA, DKK**, Kejadian isolasi gedung reaktor dalam kaitannya dengan keselamatan operasional RSG-GAS, Reaktor-Buletin pengelolaan reaktor nuklir Vol VI, PRSG, 2009.
6. **ERWANSYAH LUBIS**, Keselamatan Radiasi Lingkungan Dalam Pengelolaan Limbah Radioaktif di Indonesia, Jurnal TPL, P3LR-Batan, 2003.

LAMPIRAN

Tabel 6. *Source-term* hasil perhitungan di RSG-GAS berdasarkan daya dan lama operasi

Radionuklida	yi	T1/2		R Ci (1 siklus)	R Ci (8 siklus)
Br-82	6,10E-07	35,30	h	7,9056E+00	7,9056E+00
Kr-83m	5,30E-03	1,83	h	6,8688E+04	6,8688E+04
Kr-85m	1,31E-02	4,48	h	1,6978E+05	1,6978E+05
Kr-85	2,90E-03	10,70	y	2,9471E+02	2,2940E+03
Kr-87	2,54E-02	1,27	h	3,2918E+05	3,2918E+05
Rb-88	3,65E-02	17,80	m	4,7304E+05	4,7304E+05
Kr-88	3,58E-02	2,84	h	4,6397E+05	4,6397E+05
Rb-89	4,85E-02	15,20	m	6,2856E+05	6,2856E+05
Sr-89	4,85E-02	50,50	d	2,8376E+05	6,2341E+05
Y-90	5,90E-02	64,00	h	7,6463E+05	7,6464E+05
Sr-90	5,90E-02	29,10	y	2,2101E+03	1,7503E+04
Sr-91	5,92E-02	9,50	h	7,6723E+05	7,6723E+05
Y-91	5,92E-02	58,51	d	3,1031E+05	7,5509E+05
Sr-92	5,91E-02	2,71	h	7,6594E+05	7,6594E+05
Y-92	5,96E-02	3,54	h	7,7242E+05	7,7242E+05
Y-93	6,39E-02	10,10	h	8,2814E+05	8,2814E+05
Nb-95	6,49E-02	35,20	d	4,8570E+05	8,4025E+05
Zr-95	4,50E-02	64,00	d	2,2008E+05	5,7003E+05
Nb-97	5,76E-01	72,10	m	7,4650E+06	7,4650E+06
Zr-97	4,10E-02	16,90	h	5,3136E+05	5,3136E+05

Tc-99m	5,32E-02	6,02	h	6,8947E+05	6,8947E+05
Mo-99	6,11E-02	66,00	h	7,9184E+05	7,9186E+05
Ru-103	3,03E-02	39,30	d	2,1116E+05	3,9187E+05
Ru-105	9,64E-03	4,44	h	1,2493E+05	1,2493E+05
Rh-105	9,64E-03	35,36	h	1,2493E+05	1,2493E+05
Ru-106	4,02E-03	368,00	d	4,1209E+03	2,5151E+04
Sb-125	2,94E-04	2,77	y	1,1412E+02	8,2279E+02
Te-127	1,24E-03	9,35	h	1,6070E+04	1,6070E+04
Tb-127	1,25E-03	3,91	d	1,6193E+04	1,6200E+04
Te-129	6,93E-03	69,60	m	8,9813E+04	8,9813E+04
Tb-129	7,13E-03	4,41	h	9,2405E+04	9,2405E+04
Te-129m	7,20E-04	33,60	d	5,5469E+03	9,3244E+03
Te-131m	5,11E-03	30,00	h	6,6226E+04	6,6226E+04
I-131	2,84E-02	8,04	d	3,5959E+05	3,6806E+05
Xe-131m	4,00E-04	11,77	d	4,7898E+03	5,1840E+03
Y-132	4,21E-02	2,30	h	5,4562E+05	5,4562E+05
Te-132	4,28E-02	78,20	h	5,5464E+05	5,5469E+05
Te-133m	3,36E-02	55,40	m	4,3546E+05	4,3546E+05
I-133	6,77E-02	20,80	h	8,7739E+05	8,7739E+05
Xe-133m	1,90E-03	2,19	d	2,4624E+04	2,4624E+04
Xe-133	6,77E-02	5,25	d	8,7467E+05	8,7739E+05
Cs-134	5,39E-08	2,06	y	2,7987E-02	1,9490E-01
Xe-135m	1,06E-02	15,29	m	1,3738E+05	1,3738E+05
I-135	6,41E-02	6,61	h	8,3074E+05	8,3074E+05
Xe-135	6,63E-02	9,09	h	8,5925E+05	8,5925E+05
Cs-136	5,47E-05	13,16	d	6,3814E+02	7,0891E+02
Cs-137	6,27E-02	30,00	y	2,2784E+03	1,8049E+04
Cs-138	6,65E-02	32,20	m	8,6184E+05	8,6184E+05
Ba-139	6,35E-02	82,70	m	8,2296E+05	8,2296E+05
La-140	6,30E-02	40,27	h	8,1648E+05	8,1648E+05
Ba-140	6,29E-02	12,75	d	7,3961E+05	8,1518E+05
La-141	5,80E-02	3,93	h	7,5168E+05	7,5168E+05
Ce-141	5,90E-02	32,50	d	4,6386E+05	7,6420E+05
Ce-143	5,94E-02	33,00	h	7,6982E+05	7,6982E+05
Pr-143	5,94E-02	13,58	d	6,8729E+05	7,6982E+05
Ce-144	5,47E-02	284,30	d	7,1721E+04	4,0691E+05
Pr-145	3,92E-02	5,98	h	5,0803E+05	5,0803E+05