

## ANALISIS IRADIASI ELEMEN BAKAR RSG-GAS DENGAN PROGRAM KOMPUTER ORIGEN2

J. Sukmana S.ST, Jonnie A. Korua

**ANALISIS IRADIASI ELEMEN BAKAR RSG-GAS DENGAN PROGRAM KOMPUTER ORIGEN2.** Telah dilakukan perhitungan radioaktivitas hasil reaksi inti di teras RSG-GAS menggunakan program komputer ORIGEN2. Tujuan utama dalam kajian ini adalah menerapkan prakiraan radioaktivitas dari radionuklida yang terbentuk akibat iradiasi elemen bakar di RSG-GAS sehingga dapat dilakukan verifikasi data source-term LAK RSG-GAS atau aktivitas radiasi dalam kegiatan iradiasi suatu sampel. ORIGEN2 merupakan paket program komputer yang menghasilkan data aktivitas radiasi dalam satuan Curies termasuk diantaranya nuklida produk fisi. Masukan data dalam kajian ini berupa energi terbangkitkan atau fluks neutron dan jumlah U-235 yang berada di teras reaktor. Dengan menggunakan daya 0,656 MW/EB dan waktu operasi 176 hari dihasilkan radioaktivitas produk fisi sebesar  $2,08E+6$  Curie. Sebagai perbandingan di LAK terhitung sebesar  $1,52E+6$  Curie yang memiliki pola dan karakter yang sama dalam peluruhan hingga  $1E+8$  detik. Dengan demikian maka data Source-term RSG-GAS telah terverifikasi.

Kata kunci: ORIGEN2, produk fisi, aktinida.

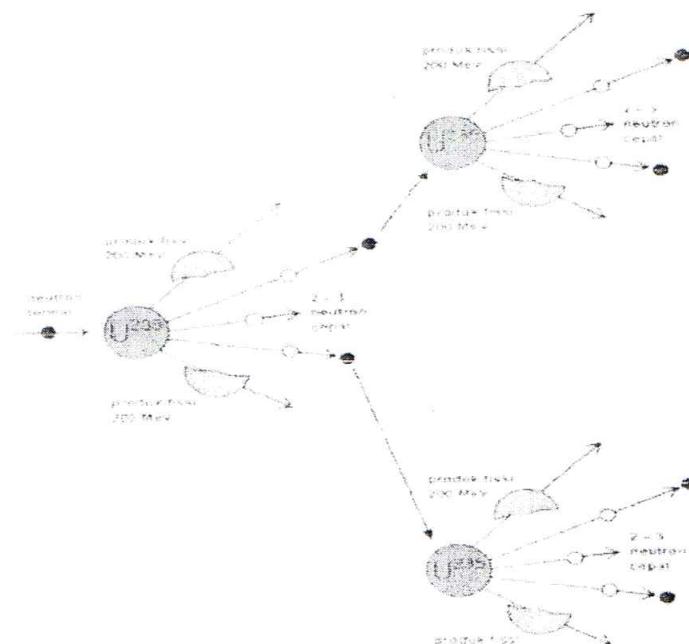
**IRRADIATION ANALYSIS OF THE RSG-GAS FUEL ELEMENT USING ORIGEN2 COMPUTER CODE.** Calculations of radioactivity of fission reaction at the RSG-GAS have been done using ORIGEN2 computer code. The main objective of this analysis is to validate source-term formed by irradiation of fuel elements of the RSG-GAS core presented of Safety Analysis Report data or to validate activities of targets irradiated of the core. ORIGEN2 is a package computer programs to generate radiation activity in Curies units including fission product and actinide. Data input in this assessment are power generated at the core or neutron fluxes and the amount of U-235 in the reactor core. At the thermal power generated of 0.656 MW/FE and operation time 176 days is fission products radioactivity produced is  $2.08E+6$  Curies. For comparison value present of fission products activities in the SAR  $1.52E+6$  Curies which have same pattern and character in the decay to  $1E+8$  seconds. Therefore, this data Source-term RSG-GAS has been verified.

Key word: ORIGEN2 Code, Fission Product, Actinides.

### PENDAHULUAN

Sumber radiasi di teras reaktor umumnya berasal 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, aktivitas radiasi, dan jenis radionuklida dapat disesuaikan dengan karakteristik komponen reaktor itu sendiri.



Gambar 1. Skema reaksi fisi berantai [2]

Radionuklida-radionuklida hasil fisi (*source-term*) secara alami terakumulasi dalam elemen bakar di teras 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.

Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy (RSG-GAS) telah memenuhi dan melaksanakan persyaratan ALARA: *As low as reasonably achievable* yang direfleksikan di dalam dokumen "Laporan Analisis Keselamatan" (LAK) RSG-GAS. Pengungkungan terhadap aktivitas radiasi di RSG-GAS didesain mulai dari bahan bakar, sistem pendinginan, tangki, sistem ventilasi, dan gedung reaktor yang secara keseluruhan merupakan sistem penghalang keluarnya produk fisi ke lingkungan.

Prakiraan besar aktivitas radiasi dan berbagai jenis radiasi di LAK RSG-GAS perlu kiranya diverifikasi. Selain itu penggunaan perangkat program terkait dapat dimanfaatkan

dalam analisis perhitungan target - baik *inventory* maupun panas peluruhannya sehingga dalam jangka panjang berguna untuk *dekommissioning* reaktor.

Perhitungan komposisi nuklida dan spektrum gamma untuk bahan struktur, produk fisi dan aktinida elemen bakar dapat dilakukan menggunakan program ORIGEN2.

Sehingga tujuan lanjutan penulisan makalah ini adalah untuk menguraikan kemampuan dari perangkat program ORIGEN2 dalam perhitungan aktivitas radiasi di reaktor untuk dapat diterapkan dalam analisis iradiasi target di RSG-GAS.

## TEORI

### Produk Fisi

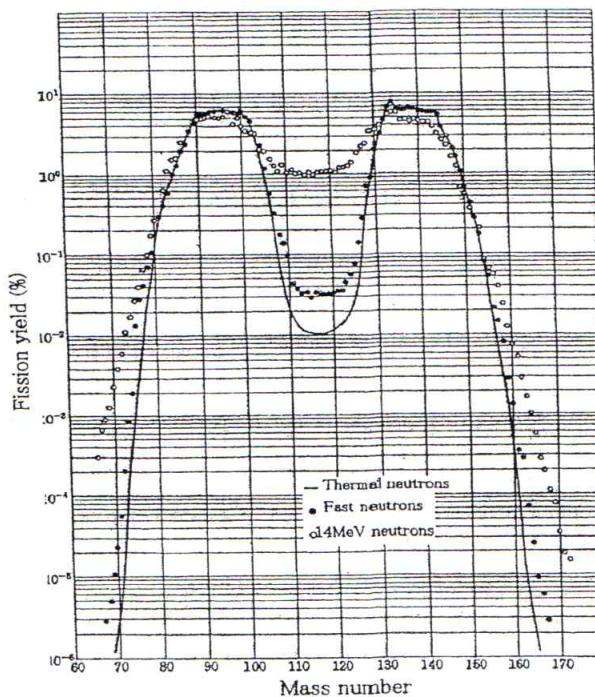
Produk fisi nuklir (*Source-term*) adalah radionuklida hasil reaksi pembelahan (*fission*) dari inti atom berat (seperti U-235) menjadi atom yang lebih ringan oleh neutron dalam reaktor nuklir.

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

Pada Gambar 2 ditunjukkan radionuklida hasil fisi berdasar nomor massa terhadap kebolehjadian pembelahan (*fission yield*). U-235 sebagai bahan fisil 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<sup>[2]</sup>. 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 karakter radionuklida yang terbentuk.



Gambar 2. Sebaran source-term berdasar yield

Daya *thermal*  $P_{(t)}$  yang dihasilkan di reaktor atau pada beberapa bagian elemen bakar (sebagai fungsi waktu) dalam setiap pembelahan mendekati 195 MeV. Rata-rata pembelahan per MW<sub>th</sub> disebut sebagai faktor fisi ( $k$ )<sup>[1]</sup>. Dimana,  $k$  mempunyai nilai:

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

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

Sehingga besarnya radioaktivitas<sup>[1]</sup> dari radionuklida hasil fisi dihitung sebagai:

$$R_i(t) = \gamma_i N_{ci}(t) = kPY_i(1 - e^{-\gamma_i t}) \dots \dots \dots (2)$$

dimana:

$R_i$  = Radioaktivitas

$k$  = faktor fisi

$P$  = Daya thermal

$\gamma_i$  = yield

$y_i = \ln 2 : T \frac{1}{2}$

$t$  = waktu/durasi operasi

Perhitungan aktivitas radiasi *source-term* RSG-GAS berdasarkan daya dan lama operasi reaktor. 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<sup>[3]</sup>.

*Source-term* RSG-GAS telah disajikan dalam LAK RSG-GAS, namun dalam segi penyajian masih perlu diperbarui.

Semua peralatan-peralatan pengungkung 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 pelehan 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*).

### Program ORIGEN2

Konsentrasi aktivitas radionuklida di teras dan lepasannya berdasar sejarah operasi dapat dihitung dan tampilan data diperoleh dari *output* program ORIGEN2.

Program ORIGEN2 menghitung akumulasi radioaktif dan peluruhan sejumlah besar nuklida-nuklida. Program tersebut

mempunyai akses ke bank data yang lengkap, misalnya nilai umur paro, skema peluruhan, penampang lintang serap neutron, dan sebagainya. Program tersebut menghitung rincian (komposisi, radiaoaktivitas, dan produksi panas) dari hasil-hasil fisi materi struktur dan aktinida<sup>[4]</sup>.

ORIGEN2 memungkinkan pengguna untuk menyesuaikan ukuran dari modul yang dieksekusi pada ruang komputer yang tersedia, ukuran berkisar sekitar 175 K (1K = 1024 byte) sampai dengan 600 K, terutama tergantung pada jumlah nuklida yang dipertimbangkan.

Nuklida pada ORIGEN2 dikelompokkan menjadi tiga segmen<sup>[4]</sup> sebagai berikut:

1. Produk aktivasi, yang terdiri dari hampir semua nuklida yang terjadi secara alami, sebagai hasil penyerapan neutron dan anak luruhnya. Segmen ini terutama digunakan untuk menangani bahan struktural (misalnya, Zircaloy) dan pengotor bahan bakar dan datanya penting untuk program *dekomissioning*.
2. Aktinida, yang berisi isotop dari unsur-unsur Thorium ( $Z=90$ ) hingga Einsteinium ( $Z=99$ ) yang muncul dalam jumlah yang signifikan dalam bahan bakar buang di reaktor ditambah anak luruhnya.
3. Produk fisi (*source term*), yang terdiri dari nuklida yang dihasilkan oleh reaksi pembelahan Aktinida ditambah anak luruh dan produk tangkapannya.

Nuklida pada ORIGEN2 diidentifikasi dengan bilangan bulat enam digit, sebagai berikut:

$$\text{NUCLID} = 10000*Z + 10*A + IS, \dots \dots \dots (3)$$

Dimana;

*NUCLID* : identifikasi nuklida dengan 6-digit

*Z* : nomor atom dari nuklida

*A* : nomor massa dari nuklida

*IS* : indicator kestabilan isomeric, 0 = ground state, 1 = excited state

Daftar perintah ORIGEN2, disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Daftar perintah ORIGEN2<sup>[4]</sup>

Perintah	Deskripsi
ADD	Tambahkan ke vektor
BAS	Per kasus
BUP	Perhitungan derajat bakar
CON	Kelanjutan
CUT	Memotong fraksi untuk meringkas tabel
DEC	Peluruhan
DOL	Melakukan loop
END	Menghentikan eksekusi
FAC	Menghitung faktor multiplikasi
HED	Judul vektor
INP	Membaca komposisi masukan terus-menerus
IRF	Fluks iradiasi
IRP	Daya iradiasi spesifik
KEQ	Faktor perkalian yang tak terbatas
LIB	Kendali cetak data
LIP	Kendali cetak data
LPU	Data kartu pengganti
MOV	Pemindahan komposisi nuklida dari vektor ke vektor
OPTA	Menentukan pilihan grup aktinida pada tampilan tabel keluaran
OPTF	Menentukan pilihan produk fisi pada tampilan tabel keluaran
OPTL	Menentukan pilihan produk aktivasi pada tampilan tabel keluaran
OUT	Mencetak hasil hitung
PCH	Penentuan vektor keluaran
PHO	Membaca data foton
PRO	Memproses ulang bahan bakar
RDA	Baca komentar kasus pada masukan
REC	Hitungan ulang
TIT	Judul
WAC	Akumulasi nuklida
GTO	Pergi ke

Sedangkan kode satuan waktu pada perintah "DEC" dikonversikan sebagai berikut:

Detik	= 1	Stabil	= 6
Menit	= 2	$10^3$ tahun	= 7
Jam	= 3	$10^6$ tahun	= 8
Hari	= 4	$10^9$ tahun	= 9
Tahun	= 5		

Data yang dihasilkan program ORIGEN2, ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter yang dihitung oleh program ORIGEN2

No. Tabel Data	Deskripsi tabel	Satuan
1,2	Komposisi isotopic setiap elemen	atom fraction, weight fraction
3,4,5,6	Komposisi	gram-atoms, atom fraction, grams, weight fraction
7,8,11,12	Radioaktivitas (total)	Ci, fractional, Bq, fractional
9,10	Daya termal	Watts, fractional
13,14	Radioaktif inhalasi hazard	m³ air, fractional
15,16	Radioaktif terkonsumsi hazard	m³ air, fractional
17,18	Kimia terkonsumsi hazard	m³ water, fractional
19,20	Serapan neutron rerata	neutron/sec, fractional
21,22	Induksi neutron rerata	fission/sec, fractional
23,24	Radioaktivitas (alpha)	Ci, fractional
25	(alpha,n) produksi neutron	neutrons/sec
26	Spontanitas neutron produk fisi	neutrons/sec
27	Emisi photon rerata	photons/sec

## TATA KERJA

Metode dalam pelaksanaan analisis perhitungan aktivitas radiasi dengan ORIGEN2 ini meliputi:

### Tahap pertama:

Penyusunan dan pemeriksaan data mengenai:

- Jumlah meteial U-235 di teras RSG-GAS.
- Memeriksa inputan utama; misalnya IRF, IRP, dst.

### c. Cara eksekusi program:

- Buka: *filspecs.dat*, beri nama file "masukan" yang dimaksud berakhiran *.inp*. beri nama file "keluaran" yang diinginkan berakhiran *.out*. Kedua file masukan dan keluaran sangat menentukan untuk eksekusi.

Contoh tampilan *filspecs* disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Contoh tampilan *filspecs* ORIGEN2

NOTUSED are here NOTUSED unit 4 [EB3].inp NUL NOTUSED [EB3NEW].out large. THERMAL LIB Library PHOTON LIB U11 U12 U13 NOTUSED CON U16	Library modifications if any  Concentrations sometimes on  This is the Origen input Unit 6 just prints the input Output vector if PCH command An output unit, can be very  Decay and Cross Section  Photon Library U11 Principal output unit. Directory of output on unit 8 Directory of output on unit 11 Unit 14 has no specific use. Normally this is sent to CON
Enter on lines 1 through 14 above the file specifications (subdirectories and file names) for Origen2-PC I/O units 3 through 16. If a unit is not to be opened, give the file specification: NOTUSED. Leaving a line blank	

will cause the file to be opened, with the program requesting a file specification from the user. A file specification of NUL or DUMMY will cause the unit to be opened, but the data flow will be to or from the NUL device. The specification CON connects the unit to the console, which for input is the keyboard and for output the display monitor. Note that each file specification must be not more than 40 characters in length, and after forty characters, comments can be added (but don't use tabs before them).

2. buka: *runorg.batch*, beri nama file yang dimaksud berakhiran *.inp* dan keluaran disiapkan mengikuti *filspecs.dat*. Batch-

file (MS-DOS) ini adalah file run-eksekusi. Tampilan *runorg.batch* seperti berikut:

```
copy %1.inp EB3.inp
origen2
copy %1.out
```

Setelah disimpan dalam *batch-file*, maka running dapat dilakukan dengan "double-click" terhadap RUNORG yang tersedia pada folder terkait.

- d. Dalam satu folder program eksekusi ORIGEN2 harus berisi file program atau data sebagai berikut:
1. *origen2.application*
  2. *runorg.ms-dos batch file*
  3. *filspecs.dat file*
  4. *photon.lib file*
  5. *thermal.lib file*

#### Tahap kedua:

Perhitungan dan proses evaluasi data dari:

- a. Hasil perhitungan ORIGEN2
- b. Hasil sortir data.

#### Tahap terakhir:

Menampilkan data rangkuman dan memverifikasi terhadap data di LAK RSG-GAS serta memberikan kesimpulan yang mendukung perlu berkembangnya *inventory source-term* dengan mengutamakan keselamatan.

Tabel 4. File data (masukan) input ORIGEN2 yang digunakan.

-1							
-1							
-1							
LIP	0	0	0				
LIB	-1	0	2	3	0	202	203
PHO		-1	-1	103	10		
INP		-1	1	-1	-1	1	1
TIT	IRADIASI SATU ELEMEN BAKAR STANDARD RSG-GAS						
BAS	MATERIAL U-235 (PERKAYAAN 19.75%)						
	BUP						
IRP	176.00	0.656	-1	1	4	4	
	BUP						
DEC	1984	1	2	1	1		
DEC	2715	2	3	1	0		
DEC	10.0	3	4	1	0		
DEC	11.0	4	5	1	0		
DEC	12.0	5	6	1	0		
DEC	15.0	6	7	1	0		
DEC	20.0	7	8	1	0		
DEC	25.0	8	9	1	0		
---	--	--	--	--	--	--	--

Tabel 4. Lanjutan

DEC	30.0	9	10	1	0
OPTA	4*8	1	8	7	15*8
OPTF	4*8	1	8	7	15*8
OPTL	4*8	1	8	7	15*8
OUT	10	1	-1	0	
	END				
2	922340	0.00	922350	250.00	922380 1265.82 0 0.00
				0	

Revisi 1: eb3.inp

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari hasil perhitungan ORIGEN2 maka dihasilkan data sebagai berikut:

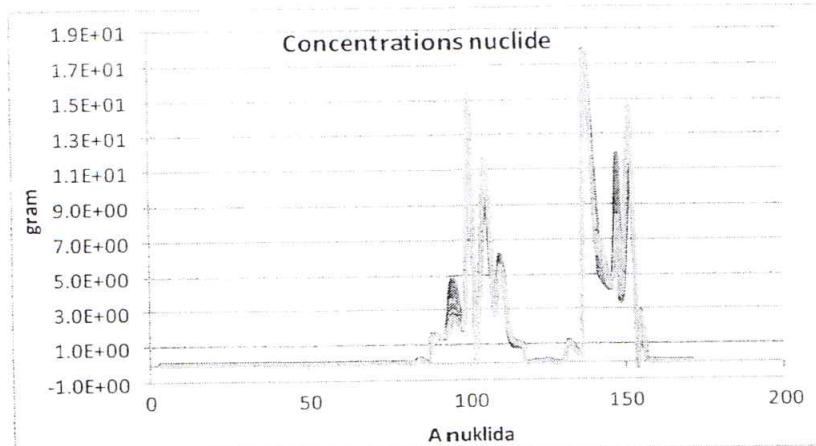
Tabel 5. Parameter awal hasil perhitungan ORIGEN2

*IRADIASI ELEMEN BAKAR STANDAR RSG-GAS	
POWER	= 6.56e-01 MW / EB
BURNUP	= 1.15456e+02 MWD
FLUX	= 7.21e+13 n/cm <sup>2</sup> -sec
TIME	= Operasi – 1.0e+08 sec
K <sub>INFINITY</sub> rate	= 1.767206
NEUT PRODN	= 4.41e+02
NEUT DESTN	= 2.50e+02

Dari data di atas, maka daya (*POWER*) setiap elemen bakar rata-rata 0,656 MW yaitu daya operasi 30 MW dari pembakaran 40 EB dan 8 EK (sebanyak 45,712 EB). Daya terbangkitkan (*BURNUP*) selama operasi (176 hari) diperoleh 115,46 MWD dan

memberikan fluks neutron 7,21e+13 n/cm<sup>2</sup>-sec. Perhitungan radioaktivitas (A) dari radionuklida produk fisi disetting hingga 1e+8 sec sesuai dengan data di LAK.

b. Konsentrasi radionuklida produk fisi

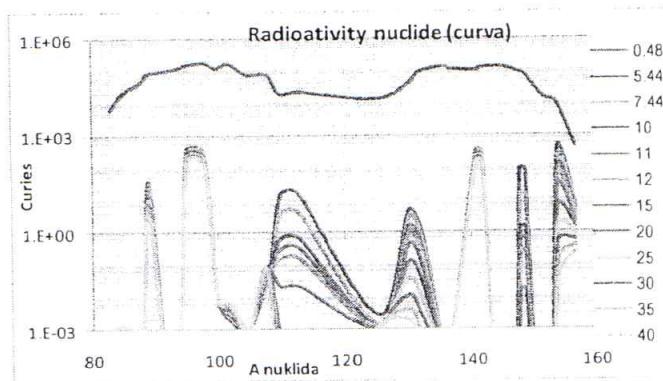


Gambar 3. Grafik konsentrasi radionuklida produk fisi

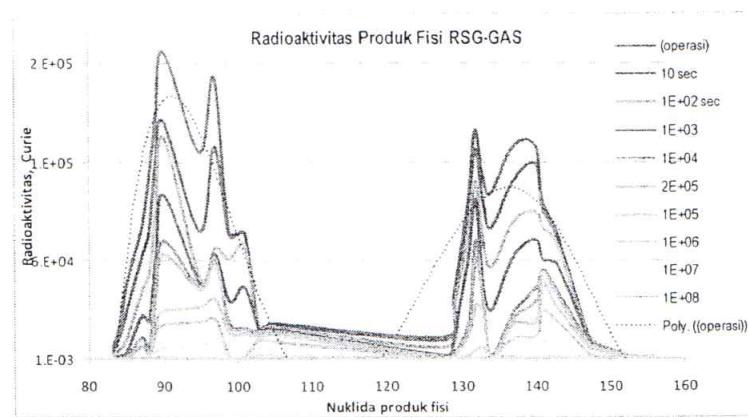
Grafik di atas menunjukkan konsentrasi radionuklida (dalam gram) sebagai hasil pembelahan (produk fisi). Konsentrasi terbesar ditunjukkan oleh nuklida dengan nomor massa antara 90 s/d 107 dan antara 127 s/d 149. Konsentrasi radionuklida produk fisi yang terhitung signifikan adalah

Zirkonium, Molebdenum, Xenon, Cerium, dan Neodymium. Kondisi menunjukkan Uranium terbagi dua dengan kemungkinan menjadi radionuklida lain yang berpasangan dan tidak stabil.

c. Data radioaktivitas nuklida produk fisi



Gambar 4.a. Grafik radioaktivitas produk fisi (hingga 40 Th.)



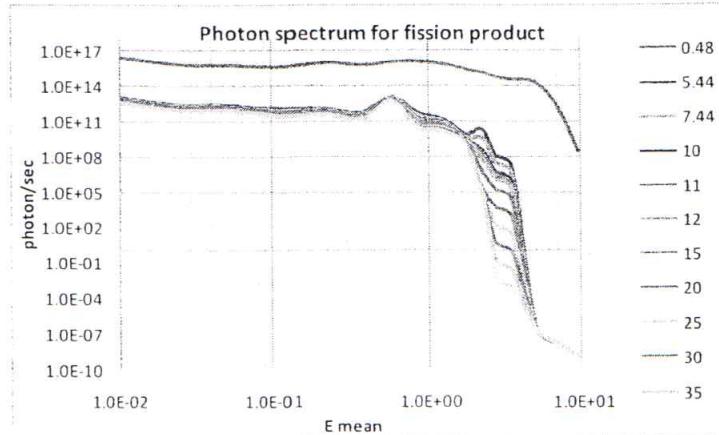
Gambar 4.b. Grafik radioaktivitas produk fisi (hingga  $1e+8$  det/3,2 Th.)

Kedua grafik di atas menunjukkan radioaktivitas nuklida dari produk fisi. Dari Gambar 4.a, ditunjukkan kondisi aktivitas radionuklida yang sangat tinggi pada periode operasi (176 hari) mencapai  $1,7e+5$  Ci terutama dari radionuklida Strontium, Yttrium, Zirkonium, dan Niobium. Nuklida yang aktif secara signifikan hingga 40 tahun yang ditunjukkan oleh Zirkonium, Niobium, Xenon, Neodymium, dan Prosesodymium.

Sedangkan dari Gambar 4.b, ditunjukkan kondisi penyebaran radioaktivitas produk fisi

pada periode hingga 3,2 tahun ( $1e8$  sec), radioaktivitas tersebut ditimbulkan oleh nuklida dengan nomor massa A 85 s/d 106 dan A 125 s/d 150 sebagaimana kurva polinom yang menunjukkan adanya dua grup nuklida produk fisi sebagai hasil belah dari U-235. Nuklida yang terhitung memberikan aktivitas tertinggi adalah Yodium, yaitu  $1,35e+5$  Ci dan jumlah radioaktivitas kumulatif selama operasi adalah  $2,08e+6$  Ci.

#### d. Spektrum photon dari produk fisi

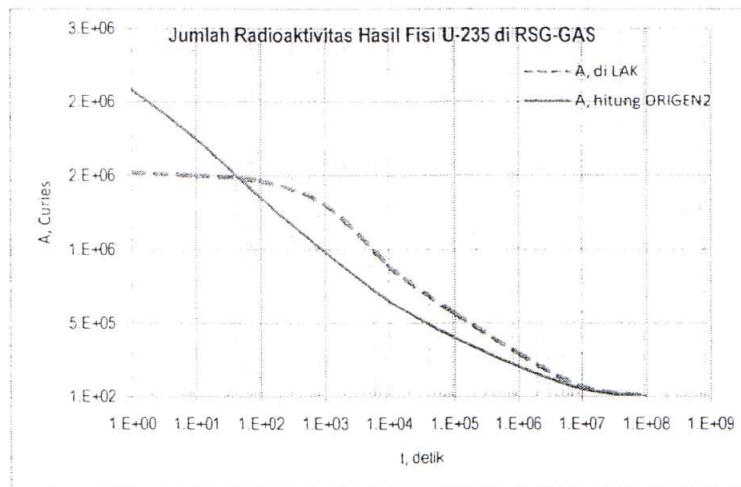


Gambar 5. Spektrum photon dari produk fisi

Grafik di atas (Gambar 5) menunjukkan spektrum foton dari radionuklida produk fisi yang terbagi dalam 18 grup. Disajikan bahwa pada energi  $1e-2$  MeV s/d  $9,5$  MeV radionuklida produk fisi mengeluarkan / menghasilkan spektrum foton dalam dua kondisi yaitu ketika periode operasi ( $176$  hari) seluruh tingkatan energi mengeluarkan foton sebesar  $1e+8$  s/d  $1e+17$  pho/sec dan ketika periode  $5$  s/d  $40$  tahun foton yang dikeluarkan menurun berkisar  $1e-10$  s/d  $1e+13$  pho/sec.

- e. Verifikasi terhadap radionuklida produk fisi di LAK RSG-GAS

Bagian data hasil yang diperlukan di LAK diantaranya ialah aktivitas produk fisi (*source-term*) dan spektrum foton yang digunakan. Rincian produk fisi hasil ORIGEN2 pada perhitungan ini disajikan pada Lampiran 1 dan secara umum telah dibahas pada Gambar 4. Sedangkan spektrum foton di LAK terbagi dalam 12 grup dan di ORIGEN2 lebih rinci yaitu menjadi 18 grup, data spektrum foton hasil ORIGEN2 ditampilkan dalam Lampiran 2 dan dibahas dalam Gambar 5. Rincian produk fisi elemen bakar di LAK RSG-GAS ditampilkan pada Bab XII Tabel XII-2a dan spektrum hasil fisi pada Tabel XII-2<sup>[3]</sup>.



Gambar 6. Peluruhan radioaktivitas produk fisi EB RSG-GAS

Dengan daya  $0,656$  MW/EB dalam waktu operasi  $176$  hari dihasilkan radioaktivitas sebesar  $2,08e+6$  Curie. Data ini dapat dibandingkan sebagai verifikasi di LAK RSG-GAS yang terhitung sebesar  $1,52e+6$  Curie. Dari grafik terlihat bahwa peluruhan radioaktivitas hasil hitung ORIGEN2 lebih landai sedangkan data di LAK hingga  $1000$  detik peluruhannya cenderung stabil. Namun demikian aktivitas keduanya pada waktu  $1e+8$  detik tinggal  $3e+3$  Curie dan terdapat kesamaan (Lampiran 1).

#### f. Hasil ORIGEN2 lainnya

Sebagaimana uraian pada Tabel 2, ORIGEN2 dapat memberikan kontribusi hasil hitungan lainnya. Hal lain yang dapat dijadikan analisis radioaktivitas lanjutan, diantaranya golongan Aktinida yang menyangkut konsentrasi (gram), radioaktivitas, dan daya thermalnya serta golongan yang menjadi sumber neutron.

Unsur aktinida yang timbul di RSG-GAS adalah Thorium, Protaktinium, Uranium, Neptunium, Plutonium, Amerisium, dan unsur yang lain yang relatif tidak signifikan

seperti Helium, Telurium, dan Kalifornium. Sedangkan radionuklida yang menghasilkan neutron (menjadi sumber neutron) dengan proses alpha-n adalah U-236, Pu-238, Pu-239 (dominan), Pu-240, Am-241 (dominan setelah 8 tahun meluruh), dan Cm-242.

## KESIMPULAN

Program ORIGEN2 dapat menghitung akumulasi zat radioaktif (Aktinida dan produk fisi), peluruhan, daya termal, mengidentifikasi sumber neutron, dan spektrum foton. Dengan asumsi RSG-GAS beroperasi pada daya 30 MW, elemen bakar menempuh operasi (*burn-up*) selama 176 hari maka populasi neutron  $K_{inf}$  rata-rata terhitung sebesar 1,84.

Konsentrasi radionuklida produk fisi terbesar ditunjukkan oleh nuklida dengan nomor massa antara 90 s/d 107 dan antara 127 s/d 149, diantaranya yang terhitung signifikan adalah Zirkonium, Molebdenum, Xenon, Cerium, dan Neodymium. Sedangkan Nuklida yang aktivitasnya sangat tinggi pada periode operasi (176 hari) mencapai  $1,35e+5$  Ci terutama dari radionuklida Yodium, Strontium, Yttrium, Zirkonium, dan Niobium. Secara keseluruhan dihasilkan radioaktivitas sebesar  $2,08e+6$  Curie.

Radionuklida produk fisi dan peluruhanya sebagai hasil perhitungan ORIGEN2 bila dibandingkan dengan data *source-term* di LAK memiliki persamaan pola dan karakter, dengan demikian maka *source-term* di LAK sudah terverifikasi sesuai dengan hasil perhitungan ulang dan tampilan data pada Bab 12 LAK dapat diperbarui.

## 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. PRSG-Batan, *Laporan Analisis Keselamatan (LAK) RSG-GAS*, Revisi 10, Serpong 2008.
4. ANONYMOUS, *ORIGEN 2.1. RSICC Computer Code Collection*, Oak Ridge National Laboratory, Tennessee, 1996. Pada Coaching analisis keselamatan Reaktor RSG-GAS dari aspek thermohidrolik dan neutronik, PRSG, 2011.