

## ANALISIS IRADIASI BERILIUM DI TERAS RSG-GAS MENGUNAKAN PROGRAM ORIGEN2

J. Sukmana, Jonnie AK., S. Suwanto, Irwan

### ABSTRAK

#### ANALISIS IRADIASI BERILIUM DI TERAS RSG-GAS MENGGUNAKAN PROGRAM ORIGEN2.

Telah dilakukan perhitungan radioaktivitas terhadap Berilium hasil reaksi aktivasi di teras RSG-GAS menggunakan program komputer ORIGEN2. Perhitungan radioaktivitas dari nuklida berilium dan pengotornya diseting dengan iradiasi mulai 176 hari dan fluks neutron di teras rata-rata  $2,30e+14$  n/cm<sup>2</sup>s. Radioisotop yang timbul dari hasil aktivasi Be diantaranya ialah tritium, litium, berilium, karbon, magnesium, aluminium, silikon, argon, kalsium, skandium, vanadium, krom, mangan, besi, kobal, nikel, tembaga, seng, perak, dan timbal. Aktivitas paling tinggi setelah 100 hari iradiasi ditunjukkan oleh Be-10 ( $7.99E-03$  Curie), H-3 ( $2.97E-03$  Curie), Cr-51, Fe-55 dan Co-60. Radioaktivitas yang ditimbulkan dari aktivasi Be semakin kecil bila waktu iradiasi berlangsung semakin panjang. Disimpulkan bahwa produk aktivasi yang terbentuk disebabkan oleh pengotor Be yaitu Mn-54, Fe-59, Zn-65, dan Li-6.

Kata kunci: *ORIGEN2*, produk aktivasi, berilium.

### ABSTRACT

#### ANALYSIS OF BERYLLIUM HAVING IRRADIATED AT THE RSG-GAS CORE USING ORIGEN2

*CODE. Analysis of activation products generated by irradiated beryllium at the RSG-GAS core has been done using ORIGEN2 code. By assuming that irradiation is 176 days, neutron flux average of  $2.30e+14$  n/cm<sup>2</sup>s, radioisotopes rose from activated Be are tritium, lithium, beryllium, carbon, magnesium, aluminum, silicon, argon, calcium, scandium, vanadium, chromium, manganese, iron, cobalt, nickel, copper, zinc, silver, and lead. The highest activity after 100 days of irradiation demonstrated by Be-10 ( $7.99E-03$  Curie), H-3 ( $2.97E-03$  Curie), Cr-51, Fe-55 and Co-60. Radioactivity generated getting smaller when irradiation time are longe. From this analysis it can be conclude that radioactivity was caused by impurities present in Be such as Mn-54, Fe-59, Zn-65, and Li-6.*

Key word: *ORIGEN2 Code, Activation product, beryllium.*

### PENDAHULUAN

Sumber radiasi di teras 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. Dengan demikian maka reaktor merupakan sumber radiasi primer terutama sebagai sumber neutron dan sinar gamma. Radionuklida-radionuklida hasil fisi 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. Bahan penyusun teras reaktor yang akan dianalisis berikut ini adalah elemen berilium dan blok reflektor berilium.

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 dan produk aktivasi 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 program jangka panjang berguna untuk *dekomissioning* reaktor.

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

**TEORI**

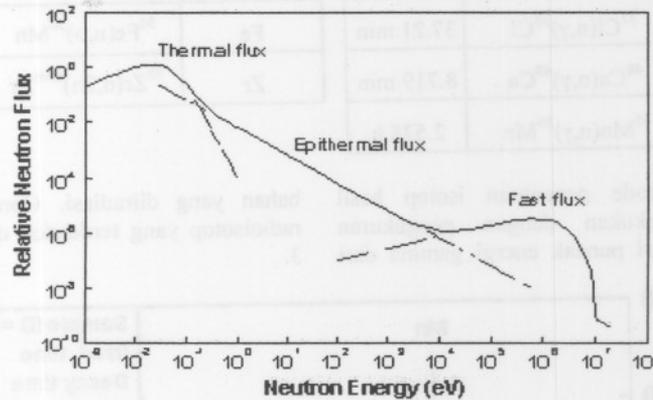
**Produk Aktivasi**

Aktivasi neutron adalah reaksi inti atom tertentu dari berbagai elemen (selain reaksi pembelahan) yang membuat isotop menjadi tidak stabil dan karena itu menimbulkan radioaktivitas dalam materi yang sebelumnya non-radioaktif.

Sejumlah radionuklida dan bahan radioaktif lain yang dilepaskan tergantung pada energi dan

banyaknya neutron, sejarah operasi, dan sistem penunjang lain dalam reaktor nuklir. Radionuklida dengan waktu-paro yang lebih pendek meluruh dengan cepat dengan berlalunya waktu selama operasi berikutnya atau ketika tidak operasi.

Energi neutron berpengaruh secara relatif terhadap probabilitas terjadinya reaksi. Reaksi fisi dan reaksi aktivasi lebih banyak dihasilkan oleh fluks neutron thermal, seperti diilustrasikan oleh Gambar 1.



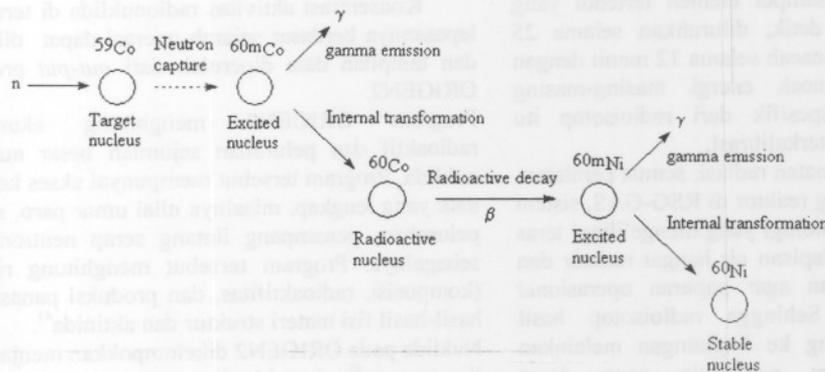
Gambar 1. Spektrum energi neutron di reaktor hubungannya terhadap relatif fluks untuk aktivasi neutron <sup>1)</sup>.

Sumber neutron di reaktor, selain dari hasil fisi U-235 juga berasal dari proses lain, seperti pada Tabel berikut:

Table 1. Isotop sumber neutron hasil tangkapan atau hamburan neutron di reaktor

-emitter	Half life	Neutrons s <sup>-1</sup> Ci <sup>-1</sup> emitted	Average neutron energy [MeV]
<sup>227</sup> Ac	22 y	1.5x10 <sup>7</sup>	4
<sup>226</sup> Ra	1620 y	1.3x10 <sup>7</sup>	3.6
<sup>239</sup> Pu	2.4x10 <sup>4</sup> y	1.4x10 <sup>7</sup>	4.5
<sup>210</sup> Po	138 d	2.5x10 <sup>6</sup>	4.3

Proses aktivasi neutron terhadap suatu nuklida terjadi melalui penangkapan neutron atau hamburan neutron yang mengakibatkan isotop menjadi tidak stabil. Dalam proses peluruhan atau perubahan kembali untuk menjadi stabil, isotop meluruh (*decay time*) dengan waktu luruh tersendiri/spesifik dan mengeluarkan radiasi pengion atau radiasi elektromagnetik, seperti diilustrasikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram proses penangkapan neutron oleh Co-59 yang diikuti oleh emisi sinar gamma

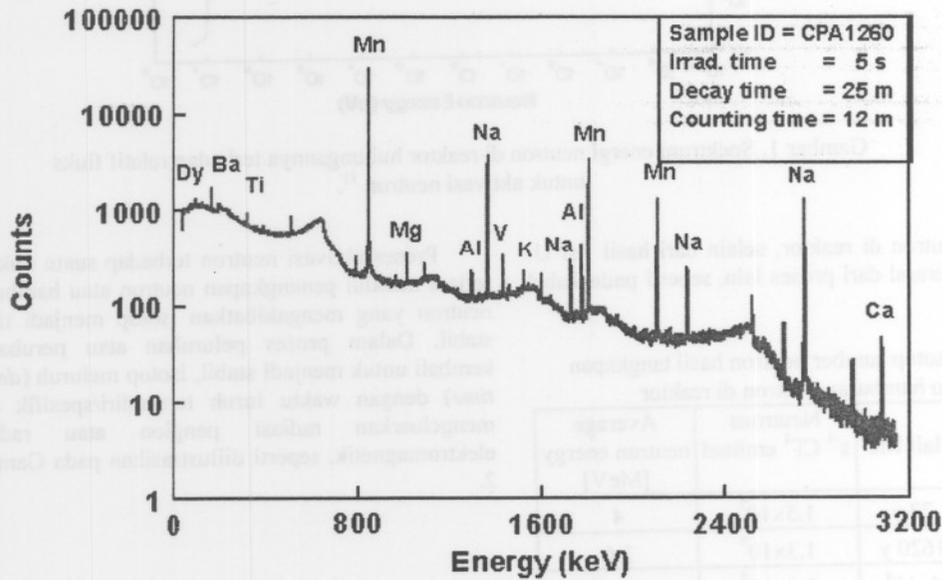
Proses reaksi nuklir dan waktu paro radioisotop di reaktor diantaranya. dapat dilihat pada tabel berikut ini.

Tabel 2. Beberapa contoh reaksi aktivasi dengan neutron

Element	Nuclear reaction	T <sub>1/2</sub>	Element	Nuclear reaction	T <sub>1/2</sub>
Na	<sup>23</sup> Na(n,γ) <sup>24</sup> Na	14.959 h	Al	<sup>27</sup> Al(n,p) <sup>27</sup> Mg	T <sub>1/2</sub> = 9.5 min
Mg	<sup>26</sup> Mg(n,γ) <sup>27</sup> Mg	9.458 min	Si	<sup>28</sup> Si(n,p) <sup>28</sup> Al	T <sub>1/2</sub> = 2.3 min
Al	<sup>27</sup> Al(n,γ) <sup>28</sup> Al	2.24 min	Ti	<sup>46</sup> Ti(n,p) <sup>46m</sup> Sc	T <sub>1/2</sub> = 18.7 s
Cl	<sup>37</sup> Cl(n,γ) <sup>38</sup> Cl	37.21 min	Fe	<sup>56</sup> Fe(n,p) <sup>56</sup> Mn	T <sub>1/2</sub> = 2.58 h
Ca	<sup>48</sup> Ca(n,γ) <sup>49</sup> Ca	8.719 min	Zr	<sup>90</sup> Zr(n,2n) <sup>89m</sup> Zr	T <sub>1/2</sub> = 4.2 min
Mn	<sup>55</sup> Mn(n,γ) <sup>56</sup> Mn	2.578 h			

Sedangkan metode penentuan isotop hasil aktivasi dapat dilakukan dengan pengukuran terhadap aktivitas dari puncak energi gamma dari

bahan yang diiradiasi. Contoh hasil pencacahan radioisotop yang terdeteksi disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Spektrum energi gamma dari radioisotop yang teraktivasi

Gambar di atas menunjukkan hasil spektrum energi gamma dari sampel elemen tertentu yang diiradiasi selama 5 detik, diluruhkan selama 25 menit, dan dihitung/dicacah selama 12 menit dengan detektor HPGe. Puncak energi masing-masing radioisotop adalah spesifik dari radioisotop itu setelah data spektrum terkalibrasi.

Dari segi keselamatan radiasi, semua peralatan-peralatan pengungkit reaktor di RSG-GAS, sistem ventilasi, dan perisai biologi yang mengelilingi teras reaktor serta sistem lapisan air hangat reaktor dan tangki tunda ditujukan agar paparan operasional serendah mungkin. Sehingga radioisotop hasil aktivasi tidak langsung ke lingkungan melainkan terbawa oleh sistem pendingin yang dapat terkendali.

**Program ORIGEN2**

Konsentrasi aktivitas radionuklida di teras dan lepasannya berdasar sejarah operasi dapat dihitung dan tampilan data diperoleh dari *out-put* 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, radioaktifitas, dan produksi panas) dari hasil-hasil fisi materi struktur dan aktinida<sup>4)</sup>.

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:  
 $NUCLID = 10000 * Z + 10 * A + IS \dots \dots \dots (1)$   
 Atau  
 $ELEMID = 10000 * Z \dots \dots \dots (2)$   
 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*  
 $ELEMID$  : identifikasi nuklida untuk  $Z < 10$
- Daftar perintah ORIGEN2, disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. 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 neutron 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
- Menit = 2
- Jam = 3
- Hari = 4
- Tahun = 5

- Stabil = 6
- $10^3$  tahun = 7
- $10^6$  tahun = 8
- $10^9$  tahun = 9

**TATA KERJA**

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

Tahap pertama:

Penyusunan dan pemeriksaan data mengenai:

- A. Jumlah material Be di teras RSG-GAS.
- B. 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 seperti berikut ini.

Tampilan *filspecs* ORIGEN2

NOTUSED	Library modifications if any are here
NOTUSED	Concentrations sometimes on unit 4
<u>Berilium</u> .inp	This is the Origen input
NUL	Unit 6 just prints the input
NOTUSED	Output vector if PCH command
<u>Berilium</u> .out	An output unit, can be very large.
THERMAL.LIB	Decay and Cross Section Library
PHOTON.LIB	Photon Library
U11	U11 Principal output unit.
U12	Directory of output on unit 8
U13	Directory of output on unit 11
NOTUSED	Unit 14 has no specific use.
CON	Normally this is sent to CON
U16	

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).

- 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 berilium.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 ORIGEN 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 menganalisis serta memberikan kesimpulan yang mendukung perlu berkembangnya *inventory activation product* dengan mengutamakan keselamatan.

Tampilan: File data (masukan) input ORIGEN2 yang digunakan.

```

-1
-1
-1
LIP      0  0  0
LIB     -1  1  2  3  201  202  203  9  1  0  1  0
PHO     101 102 103 10
RDA     BACA DATA KOMPOSISI Be STANDAR NUKLIR
INP     1  1  -1  -1  1  1
TIT     IRADIASI 10 kg Be
BAS     PENGKAYAAN : 98%
HED     1 INITIAL
BUP
IRF     176.0  2.30E+14  1  2  4  2
BUP
DEC     1.0  2  3  3  4
DEC     10.0  3  4  4  0
DEC     100.0  4  5  4  0
DEC     500.0  5  6  4  0
DEC     1000.0  6  7  4  0
DEC     5000.0  7  8  4  0
DEC     10000.0  8  9  4  0
DEC     30000.0  9  10  4  0
DEC     50000.0  10  11  4  0
DEC     75000.0  11  12  4  0
OPTL    4*8  1  8  1  8  1  3*8  1  8  1  8  4  7*8
OPTA    4*8  1  8  1  8  1  3*8  1  8  1  8  4  7*8
OPTF    4*8  1  8  1  8  1  3*8  1  8  1  8  4  7*8
OUT     12  1  -1  0
END
4  40000  10.00  260560  0.00180  130270  0.00150  60120  0.00150
4  120240  0.00080  140280  0.00080  240520  0.00040  250550  0.00040
4  200400  0.00020  290640  0.00020  822070  0.00002  420960  0.00002
4  80000  1.00  270590  0.00001  471080  0.00001  300650  0.00001
4  30000  0.00001  481120  0.000005  50000  0.000005  0  0.00
0
    
```

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

**A. Data awal hasil perhitungan ORIGEN2 secara umum**

Data: Parameter awal hasil perhitungan ORIGEN2

```

*IRADIASI BERILIUM STANDAR RSG-
GAS
FLUX      = 2.30e+14 n / cm2 s
BURNUP    = -
FLUX AVG  = 2.30e+14 n / cm2 s
TIME      = Operasi (176 hari
           s/d 20 th.)
K INFINITY rate = -
NEUT PRODN = -
NEUT DESTN = 7.21e-04
    
```

Dari data di atas, maka fluks neutron di teras rata-rata 2,30e+14 n/cm<sup>2</sup>s . Daya terbangkitkan (BURNUP) selama operasi tidak dimunculkan dan memberikan neutron destructive hingga 7,21e-4

n/cm<sup>2</sup>-sec. K-inf dan n prod tidak ada, dikarenakan target yang diiradiasi bukan bahan fisil. Perhitungan radioaktivitas (A) dari nuklida berilium dan pengotornya diseting selama 8 siklus operasi (176 hari) hingga 20 tahun untuk keperluan analisis dan perencanaan dekomisioning.

**B. Radioaktivitas produk aktivasi**

Nuklida utama yang diiradiasi adalah berilium (Be-9, Beryllium), dengan komposisi Be-assay 98% dan Be-oksida 2% sedangkan pengotor (impurity) menurut standar nuklir diantaranya yaitu Fe 1800 ppm, C 1500 ppm, Al 1500 ppm, Mg 800 ppm, Si 800 ppm, dan lainnya yaitu Li, Ca, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Ag, Pb, B, Mo, Cd.

Data radioaktivitas hasil perhitungan ORIGEN ditampilkan pada Tabel 3, sedangkan variasi untuk analisisnya disajikan dalam bentuk grafik-grafik.

Tabel 3. Radioaktivitas hasil ORIGEN2 dari aktivasi 10 kg Berilium di RSG-GAS

INITIAL	CHARGE	A ketika iradiasi	Aktivitas pada waktu peluruhan (Curie) ket: HR:hour, D:day									
		176.0D	1.0HR	5D	1.0D	3.0D	6.0D	10.0D	20.0D	40.0D	60.0D	100.0D
H-3	0.0	3.02E-03	3.02E-03	3.02E-03	3.02E-03	3.02E-03	3.01E-03	3.01E-03	3.01E-03	3.00E-03	2.99E-03	2.97E-03
Be-10	0.0	7.99E-03	7.99E-03	7.99E-03	7.99E-03	7.99E-03	7.99E-03	7.99E-03	7.99E-03	7.99E-03	7.99E-03	7.99E-03

Tabel 3. Lanjutan

INITIAL	CHARGE	A ketika iradiasi	Aktivitas pada waktu peluruhan (Curie) ket: HR:hour, D:day									
		176.0D	1.0HR	.5D	1.0D	3.0D	6.0D	10.0D	20.0D	40.0D	60.0D	100.0D
Be-11	0.0	1.34E-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Al-28	0.0	4.78E-02	4.17E-10	2.63E-12	1.77E-12	3.60E-13	3.31E-14	1.37E-15	4.80E-19	5.91E-26	7.30E-33	0.0
Ar-37	0.0	4.37E-05	4.37E-05	4.33E-05	4.29E-05	4.12E-05	3.88E-05	3.59E-05	2.94E-05	1.98E-05	1.33E-05	6.04E-06
Ca-45	0.0	2.05E-04	2.05E-04	2.05E-04	2.05E-04	2.03E-04	2.00E-04	1.97E-04	1.89E-04	1.73E-04	1.59E-04	1.34E-04
Cr-51	0.0	1.88E-02	1.88E-02	1.86E-02	1.84E-02	1.75E-02	1.62E-02	1.47E-02	1.14E-02	6.92E-03	4.19E-03	1.54E-03
Mn-56	0.0	3.46E-01	2.64E-01	1.37E-02	5.46E-04	1.36E-09	5.35E-18	3.32E-29	0.0	0.0	0.0	0.0
Fe-55	0.0	1.89E-03	1.89E-03	1.89E-03	1.89E-03	1.89E-03	1.88E-03	1.88E-03	1.87E-03	1.84E-03	1.81E-03	1.76E-03
Fe-59	0.0	3.94E-04	3.94E-04	3.91E-04	3.88E-04	3.76E-04	3.59E-04	3.38E-04	2.89E-04	2.13E-04	1.56E-04	8.44E-05
Co-60	0.0	1.35E-03	1.35E-03	1.35E-03	1.35E-03	1.35E-03	1.34E-03	1.34E-03	1.34E-03	1.33E-03	1.32E-03	1.30E-03
Co-60m	0.0	1.12E-02	2.10E-04	2.22E-23	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cu-64	0.0	3.61E-02	3.42E-02	1.88E-02	9.74E-03	7.09E-04	1.39E-05	7.39E-08	1.51E-13	6.34E-25	2.77E-36	0.0
Cu-66	0.0	7.81E-03	2.25E-06	7.44E-09	6.39E-09	3.47E-09	1.39E-09	4.12E-10	1.96E-11	4.42E-14	1.02E-16	5.19E-22
Zn-65	0.0	9.31E-05	9.31E-05	9.29E-05	9.28E-05	9.23E-05	9.15E-05	9.05E-05	8.79E-05	8.31E-05	7.85E-05	7.01E-05
Ag-108	0.0	5.40E-03	1.18E-07	1.18E-07	1.18E-07	1.18E-07	1.18E-07	1.18E-07	1.18E-07	1.18E-07	1.18E-07	1.18E-07
Ag-110	0.0	1.07E-02	2.49E-06	2.49E-06	2.49E-06	2.47E-06	2.45E-06	2.43E-06	2.36E-06	2.23E-06	2.11E-06	1.89E-06
Ag-110m	0.0	1.88E-04	1.88E-04	1.87E-04	1.87E-04	1.86E-04	1.84E-04	1.82E-04	1.77E-04	1.68E-04	1.59E-04	1.42E-04
Ag-111	0.0	1.10E-04	1.10E-04	1.05E-04	1.00E-04	8.33E-05	6.30E-05	4.34E-05	1.71E-05	2.66E-06	4.14E-07	1.00E-08
Pb-204	3.45E-21	3.44E-21	3.44E-21	3.44E-21	3.44E-21	3.44E-21	3.44E-21	3.44E-21	3.44E-21	3.44E-21	3.44E-21	3.44E-21
TOTAL	3.45E-21	6.35E-01	3.33E-01	6.64E-02	4.40E-02	3.34E-02	3.14E-02	2.98E-02	2.64E-02	2.17E-02	1.89E-02	1.60E-02

Radioisotop yang timbul dari hasil aktivasi seperti yang ditunjukkan dari tabel di atas, diantaranya ialah tritium, litium, berilium, karbon, magnesium, aluminium, silikon, argon, kalsium, skandium, vanadium, krom, mangan, besi, kobalt, nikel, tembaga, seng, perak, dan timbal.

Aktivitas paling tinggi ketika diiradiasi diberikan oleh Be-11 (1.34E-01 Curie) dan Mn-56 (3.46E-01 Curie), sedangkan setelah 100 hari

iradiasi (decay time), aktivitas masih tinggi ditunjukkan oleh Be-10 (7.99E-03 Curie), H-3 (2.97E-03 Curie), Cr-51, Fe-55 dan Co-60.

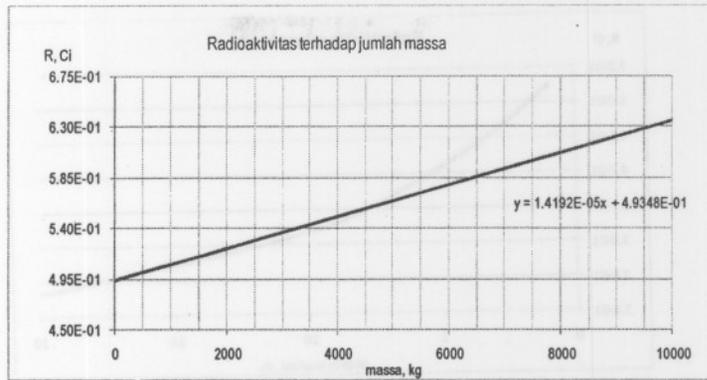
Lepasan tritium (H-3) seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3, berawal dari aktivasi Be-9 itu sendiri dan aktivasi terhadap pengotornya yaitu Li-6 dan B-10. Reaksi aktivasi dari ketiga nuklida tersebut dapat dinotasikan sebagai berikut:

Reaksi Be-9	2) Reaksi Li-6	3) Reaksi B-10
${}^9_4\text{Be} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^6_2\text{He} + \alpha$	${}^6_3\text{Li} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^3_1\text{H} + \alpha$	${}^{10}_5\text{B} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^3_1\text{H} + \alpha$
${}^6_2\text{He} \rightarrow {}^6_3\text{Li} + {}_{-1}\beta$		
${}^6_3\text{Li} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^3_1\text{H} + \alpha$		

Besaran kualitas radioaktivitas produk aktivasi ini bila dibandingkan terhadap radioaktivitas produk fisi nilainya masih relatif sangat kecil, dapat dinyatakan dengan sepersejuta kalinya.

**C. Radioaktivitas nuklida dengan variasi massa Be, waktu iradiasi, dan peluruhan**  
**a. Variasi Massa berilium**

Proses aktivasi Be dilakukan dengan variasi massa. Iradiasi Be diasumsikan variatif mulai dengan 1 gr s/d 10 kg. diharapkan dapat memperkirakan jumlah radioaktivitas produk aktivasi Be bila jumlah massanya dapat tervalidasi. Hasil running ORIGEN dengan variasi massa Be tersebut, ditunjukkan sebagai berikut:

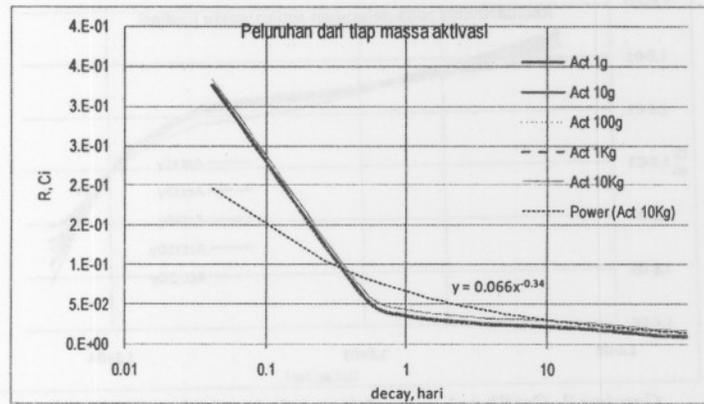


Gambar 4. Radioaktivitas nuklida dengan variasi massa Be

Dari grafik terlihat bahwa aktivitas radiasi yang ditimbulkan dari aktivasi terhadap berilium meningkat secara linier terhadap jumlah massa Be

yang diiradiasi. Persamaan linier yang diperoleh yaitu  $y = 1,4192e-5x + 0,49348$  Ci.

Sedangkan radioaktivitas saat *decay* dari variasi Be dapat diamati pada grafik berikut ini:



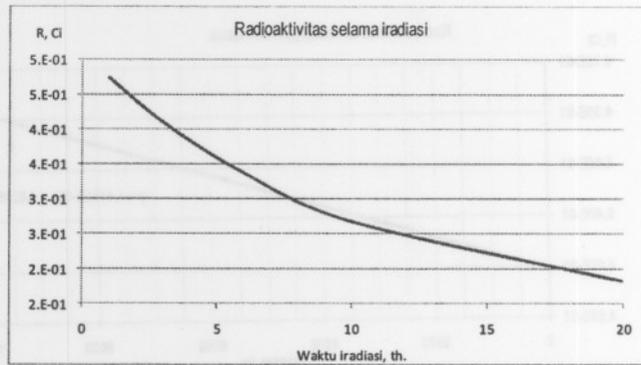
Gambar 5. Grafik peluruhan (*decay*) dari setiap massa target Be

Dari grafik di atas terlihat bahwa radioaktivitas hasil aktivasi Be akan secara cepat meluruh menjelang 1 hari setelah iradiasi. Peluruhan dari aktivasi sebanyak 1 gram hingga 10 kg ternyata mengikuti pola yang sama, meluruh secara eksponensial. Teramati hanya yang 10 kg yang sedikit lebih besar aktivitasnya. Diketahui bahwa waktu paro  $T_{1/2}$  isotop Be yaitu 53,12 d bila Be-7 menjadi Li-7, 7e-17 s bila Be-8 menjadi He-4, dan 1,36e+6 y bila Be-10 menjadi B-10. Sedangkan Be-9 harus melalui tiga tahapan reaksi hingga melepaskan

tritium dengan  $T_{1/2}$  12,32 y. Dengan ilustrasi pola grafik decay di atas maka peluruhan Be dan pengotornya terjadi cukup singkat.

#### b. Variasi waktu iradiasi

Aktivasi terhadap Be juga dilakukan dengan variasi waktu iradiasi. Untuk kepentingan analisis hal ini sangat diperlukan. Waktu iradiasi yang disimulasikan yaitu mulai 176 hari sampai dengan 20 tahun. Hasilnya dalam bentuk grafik dapat diamati sebagai berikut;

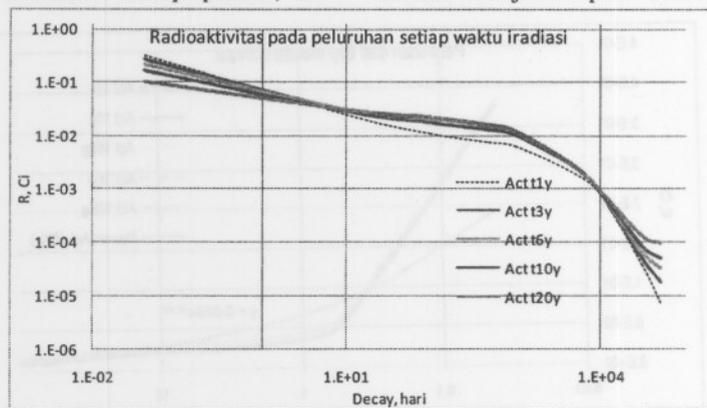


Gambar 6. Grafik radioaktivitas aktivasi Be variasi waktu iradiasi

Dari grafik di atas terlihat bahwa radioaktivitas yang ditimbulkan dari aktivasi Be semakin sedikit (kecil) bila waktu iradiasi berlangsung semakin panjang. Hal ini secara logika karena waktu paro radioisotop yang terbentuk cukup pendek, Be-9

stabil (tidak terjadi reaksi nuklir) dan mengikuti hukum fraksi bakar (aktivasi), yaitu nuklida yang stabil yang teraktivasi berkurang.

Radioaktivitas *decay* dengan variasi waktu iradiasi ditunjukkan pada Grafik berikut ini:

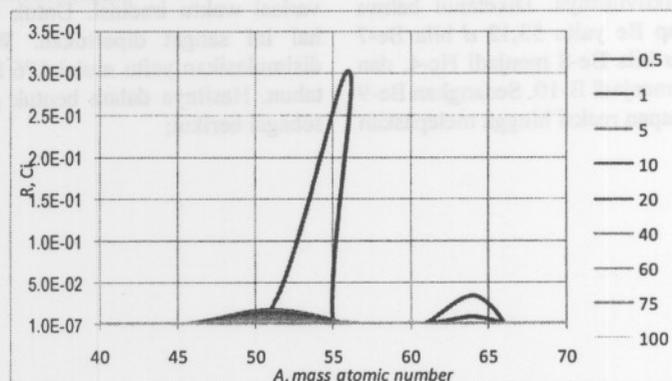


Gambar 7. Grafik peluruhan (*decay*) dari variasi waktu iradiasi

Dari grafik terlihat bahwa peluruhan dari aktivasi Be dengan variasi waktu iradiasi yang berbeda yaitu mulai iradiasi selama 1 tahun sampai dengan 20 tahun, proses *decay*/peluruhannya sama atau mengikuti pola yang sama. Akan tetapi masih dapat dinyatakan bahwa radioaktivitas *decay* yang iradiasinya 1 tahun, lebih rendah.

### c. Radioisotop spesifik hasil aktivasi Be

Radioaktivitas dari radioisotop hasil aktivasi yang dominan dapat ditunjukkan dari running program ORIGEN aktivasi Be dengan variasi decay. Radioisotop spesifik ini dapat diamati pada Grafik 8.



Gambar 8. Grafik radionuklida spesifik pada waktu luruhnya

Dari 10 kg Be, aktivitas tertinggi ditunjukkan ketika 1/2 hari setelah iradiasi (kurva warna biru) yaitu dari isotop pada nomor massa 53 s/d 56 (Mn dan Fe) dan isotop pada nomor massa 62 s/d 66 (Cu dan Zn). Sehingga lebih jelas bahwa iradiasi Be tidak memberikan radioaktivitas secara signifikan. Radioaktivitas yang ada disebabkan oleh pengotornya yaitu Mn ( $T_{1/2}:2,6$  h), Fe ( $T_{1/2}:2,6$  h), Cu (stabil), dan Zn ( $T_{1/2}:244$  d).

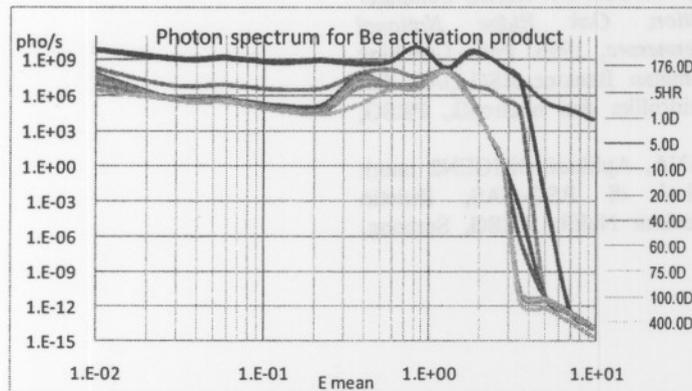
Berikut ini dihitung juga iradiasi dengan program ORIGEN2, terhadap Be murni (tanpa pengotor), hasilnya ditunjukkan pada Tabel 4. Dari tabel tersebut jelas, bahwa iradiasi terhadap Be murni maka radioaktivitas yang timbul tidak signifikan, yaitu  $7,99 \times 10^{-6}$  Ci setelah iradiasi. Be-9 terkondisi tidak reaktif terhadap neutron sedangkan Be-10 menjadi B-10 dengan waktu paro sangat singkat begitu juga Be-11.

Tabel 4. Radiokativitas Be murni

	Charge	176.0D	.5HR	1.0D	5.0D	10.0D	20.0D	40.0D	60.0D	75.0D	100.0D	400.0D
Be-10	0.0	7.99E-06										
Be-11	0.0	1.34E-04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
SUMTOT	0.0	1.42E-04	7.99E-06									
TOTAL	0.0	1.42E-04	7.99E-06									

#### D. Spektrum photon dari produk aktivasi Be

Ditinjau dari spektrum foton yang timbul dari aktivasi Be maka kondisinya dapat diamati pada Grafik berikut ini:



Gambar 9. Spektrum photon dari produk aktivasi

Grafik di atas menunjukkan spektrum foton dari radionuklida produk aktivasi Be yang terbagi dalam 18 grup. Disajikan bahwa pada energi 1e-2 MeV s/d 9,5 MeV radionuklida produk aktivasi mengeluarkan efek spektrum foton dalam dua kondisi yaitu pada tingkatan energi kurang 1,2 MeV mengeluarkan foton lebih dari  $1 \times 10^3$  s/d  $1 \times 10^{19}$  pho/sec dan ketika energi lebih dari 1,2 MeV maka spektrum foton yang dikeluarkan menurun hingga  $1 \times 10^{-15}$  pho/sec. Hal ini juga berbeda dengan spektrum photon produk fisi yang menghasilkan spektrum foton hingga  $1 \times 10^{17}$  pho/sec<sup>5</sup>.

#### E. Verifikasi Produk Aktivasi Be Sebagai yang Tertuang di LAK RSG-GAS

Dalam laporan analisis keselamatan (LAK) RSG-GAS radioaktivitas yang timbul dalam sistem pendingin primer JE-01 adalah C0-60, Fe-59, Ni-65, Co-58, Mn-56, Cr-51, Mg-27, dan Al-28<sup>2)</sup>. Aktivitas tertinggi terdata berasal dari krom dan aluminium yaitu hingga  $1,5 \times 10^{-3}$  Ci/m<sup>3</sup> dan tritium dengan aktivitas s/d  $5 \times 10^{-3}$  Ci/m<sup>3</sup> yang berasal dari pengotor

Li-6. Namun demikian, data tersebut berasal dari berbagai komponen penyusun teras reaktor.

#### KESIMPULAN.

Radioisotop yang timbul dari hasil aktivasi Be diantaranya ialah tritium, litium, berilium, karbon, magnesium, aluminium, silikon, argon, kalsium, skandium, vanadium, krom, mangan, besi, kobal, nikel, tembaga, seng, perak, dan timbal. Aktivitas paling tinggi ketika diiradiasi berasal dari Be-11 ( $1.34 \times 10^{-1}$  Curie) dan Mn-56 ( $3.46 \times 10^{-1}$  Curie), sedangkan setelah 100 hari iradiasi (*decay time*), aktivitas masih tinggi ditunjukkan oleh Be-10 ( $7.99 \times 10^{-3}$  Curie), H-3 ( $2.97 \times 10^{-3}$  Curie), Cr-51, Fe-55 dan Co-60. Aktivitas radiasi yang ditimbulkan meningkat secara linier terhadap jumlah massa Be yang diiradiasi, namun radioaktivitas akan secara cepat meluruh menjelang 1 hari setelah iradiasi.

Radioaktivitas yang ditimbulkan dari aktivasi Be semakin sedikit (kecil) bila waktu iradiasi berlangsung semakin panjang, karena waktu paro radioisotop dominan yang terbentuk cukup pendek antara 2,24 min s/d 2,6 h dan mengikuti hukum

