

ANALISIS AKTIVITAS SUMBER RADIASI DAN INTENSITAS SINAR GAMMA DI TERAS REAKTOR PWR 1000 MWe

Ardani

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir, BATAN
Kawasan Puspipstek, gedung 80 Serpong

Diterima editor 17 September 2010

Disetujui untuk dipublikasi 08 Oktober 2010

ABSTRAK.

ANALISIS AKTIVITAS SUMBER RADIASI DAN INTENSITAS SINAR GAMMA DI TERAS REAKTOR PWR 1000 MWe. Salah satu PLTN kelas 1000 MWe adalah AP1000, reaktor dengan daya operasi penuh 3400 MWt. Sinar gamma dalam teras reaktor berasal dari tiga jenis sumber: 1) sinar gamma hasil reaksi penangkapan radiatif, 2) sinar gamma hasil reaksi pembelahan spontan dan 3) sinar gamma peluruhan radionuklida hasil pembelahan dan peluruhan radionuklida hasil aktivasi material dalam teras. Komposisi nuklida dalam teras merupakan parameter untuk menentukan laju reaksi penangkapan radiatif. Paket program ORIGEN-2 digunakan untuk menghitung aktivitas radionuklida dalam teras reaktor dan intensitas sinar gamma peluruhannya. Dengan asumsi reaktor dioperasikan pada daya penuh selama 540 hari tanpa gangguan, sebagian besar aktivitas radionuklida hasil pembelahan cenderung stabil, sedangkan aktivitas radionuklida hasil aktivasi material dan aktivitas aktinida cenderung meningkat seiring dengan waktu operasi. Aktivitas terbesar adalah aktivitas radionuklida hasil pembelahan yang totalnya mencapai $6,8 \times 10^9$ curie pada akhir operasi, diikuti aktivitas aktinida $1,06 \times 10^9$ curie, kemudian aktivitas radionuklida hasil aktivasi $5,98 \times 10^6$ curie. Energi sinar gamma terentang antara 0 - 11 MeV, dikelompokkan dalam 7 kelas energi. Sumber sinar gamma penangkapan radiatif memberikan kontribusi intensitas yang paling tinggi diikuti oleh intensitas sinar gamma hasil pembelahan spontan kemudian intensitas sinar gamma hasil peluruhan. Secara umum sinar gamma kelas energi rendah mempunyai intensitas yang lebih besar dibanding intensitas sinar gamma kelas energi tinggi.

Kata kunci : PLTN AP1000, aktivitas radionuklida, curie, intensitas sinar gamma, foton

ABSTRACT

ANALYSIS OF THE RADIATION SOURCE ACTIVITY AND INTENSITY OF GAMMA RAYS AT 1000 MWE PWR REACTOR CORE. ONE OF THE 1000 MWE. One of the 1000 MWe class nuclear power plant is the AP1000, full operating power reactors by 3400 MWt. Gamma rays in the reactor core derived from three types of sources :1) gamma ray results of radiative capture reactions,2) gamma rays result of spontaneous fission reaction and 3) gamma ray decay of radionuclides and the decay of the fission radionuclides results from material activation in the core. Nuclides composition in the core is a parameter to determine the radiative capture reaction rate, calculated using the Origen-2 program package. The code was also used to calculate the activity of radionuclides in the reactor core and gamma ray intensity decay. with the assumption that the reactor operated at full power for 540 days without trouble, most of the activity of radionuclide fission results tend to be stable, whereas the activity of radionuclide activity and the activity of actinide material tends to increase with time of operation. The highest activity is the radionuclide activity of the fission product which totals 6.8×10^9 curies at the end of reactor operation, followed by the activity of actinide 1.06×10^9 curis, then the result of activation of radionuclide activity 5.98×10^6 curis. Gamma ray energy ranges between 0-11 MeV, grouped in 7 classes of energy. Radiative capture gamma ray sources contributing the highest intensity followed by the intensity of gamma rays result of spontaneous fission, then the intensity of the decay gamma rays. In general, low-energy gamma rays classes have a greater intensity than the intensity of high energy gamma rays.

Key word : AP1000 nuclear power plant, activity of radionuclides, curie, intensity of gamma rays, photon.

PENDAHULUAN

Salah satu pembangkit listrik tenaga nuklir yang yang dikembangkan saat ini adalah PLTN jenis PWR yang dinamai AP1000 dengan daya 3400 MWt. Reaktor ini menggunakan bahan bakar jenis UO_2 dengan perkayaan bervariasi yaitu 2,35%, 3,40% dan 4,45%, jumlah elemen bakar 157 buah (perkayaan 2,35% sebanyak 53 buah, perkayaan 3,40% 52 buah dan perkayaan 4,45% 52 buah) dalam susunan elemen bakar dalam bentuk kisi kisi 17×17 [1].

Saat reaktor dioperasikan terdapat tiga proses utama yang menghasilkan radiasi gamma yaitu [2,3]: 1. proses penangkapan radiatif (*radiative capture*), hasil gammanya disebut sinar gamma tangkapan neutron (*neutron capture gamma rays*), 2. proses pembelahan bahan fisil, menghasilkan sinar gamma yang disebut sinar gamma pembelahan spontan (*prompt fission gamma rays*), 3. proses peluruhan zat radioaktif menghasilkan sinar gamma peluruhan (*decay product gamma rays*). Sinar gamma peluruhan dikelompokkan dalam 3 kelompok yaitu sinar gamma peluruhan dari aktinida, sinar gamma peluruhan dari nuklida hasil pembelahan dan sinar gamma peluruhan dari nuklida hasil aktivasi.

Dalam makalah ini dibahas dua aspek yaitu: pertama, aktivitas radionuklida dalam teras reaktor, kedua, intensitas sinar gamma hasil proses penangkapan radiatif, proses pembelahan spontan dan proses peluruhan zat radioaktif. Pembahasan dibatasi pada aktivitas radionuklida dan intensitas foton gamma pada material dalam teras aktif PLTN, tidak termasuk terbentuknya sinar gamma di luar teras PLTN akibat aktivasi neutron terhadap material di luar teras. Diasumsikan bahwa reaktor beroperasi pada daya penuh yaitu 3400 MWt dan waktu operasi sampai 540 hari (satu siklus) secara terus menerus tanpa pemadaman maupun perubahan daya. Sumber sinar gamma yang dipertimbangkan yaitu meliputi sumber gamma seluruh teras tidak tergantung pada posisinya dalam teras.

Intensitas sinar gamma hasil proses penangkapan radiatif dan proses pembelahan spontan ditentukan dengan metoda analitik sedangkan aktivitas radionuklida dan intensitas sinar gamma peluruhan dihitung menggunakan paket program ORIGEN-2. Analisis dilakukan terhadap kecenderungan perubahan aktivitas radionuklida dan intensitas sinar gamma selama reaktor dioperasikan dalam satu siklus.

Tujuan analisis ini adalah untuk mendapatkan kadar aktivitas zat radioaktif dan intensitas sinar gamma dalam teras reaktor dari awal beroperasi sampai saat pemadaman. Data itu kelak bisa digunakan untuk masukan dalam perhitungan tebal perisai biologi di sekitar teras reaktor dan perhitungan dosis radiasi di sekitar teras pada saat reaktor beroperasi. Aktivitas radionuklida pada akhir operasi bisa digunakan untuk data dukung penentuan penerimaan dosis pada pekerja radiasi pada saat pemeliharaan reaktor sesudah pemadaman, pengelolaan keselamatan lingkungan dan pengelolaan bahan bakar bekas.

TEORI

Sinar Gamma Dari Proses Reaksi Penangkapan Radiatif.

Dalam medium berstruktur tunggal denganampang lintang serapan makroskopik Σ_a , yang ditembaki neutron termal dengan fluks neutron ϕ_t , laju serapan neutronnya adalah [4,5]:

$$\text{Laju serapan netron} = \Sigma_a \times \phi_t \quad (1)$$

Sesudah neutron terserap oleh inti atom terjadi beberapa kemungkinan antara lain reaksi penangkapan radiatif (*radiative capture*), reaksi partikel bermuatan (misalnya reaksi (n,p)) atau reaksi pembelahan (untuk atom bahan fisil). Reaksi penangkapan radiatif adalah serapan

neutron oleh inti atom diikuti dengan pancaran sinar gamma disebut juga reaksi (n,γ) . Sinar gammanya disebut sinar gamma penangkapan radiatif (*radiative capture gamma rays*). Apabilaampang lintang makroskopik penangkapan radiatifnya Σ_γ , maka laju reaksi penangkapan radiatif q bisa dituliskan sebagai berikut:

$$q = \Sigma_\gamma \times \phi_t \quad (2)$$

Dalam medium berstruktur campuran yang terdiri dari lebih dari satu nuklida, laju reaksi penangkapan radiatif oleh nuklida ke- i adalah :

$$q_i = \Sigma_{\gamma i} \times \frac{w_i}{\rho_i} \times \phi_t \quad (3)$$

dengan,

$\Sigma_{\gamma i}$ = tampang lintang penangkapan makroskopik isotop ke- i (cm^{-1});

w_i = massa nuklida ke- i dalam campuran (g/cm^3);

ρ_i = densitas nuklida ke- i (g/cm^3);

ϕ_t = fluks neutron termal ($\text{n}/\text{cm}^2/\text{detik}$);

q_i = laju reaksi penangkapan radiatif untuk nuklida ke- i ($\text{reaksi}/\text{cm}^3/\text{detik}$).

Karena fluks termal di dalam reaktor tidak merata, maka untuk menentukan laju reaksi penangkapan radiatif total dalam teras reaktor ditentukan berdasarkan fluks termal totalnya di dalam teras reaktor dengan persamaan:

$$Q_i = \Sigma_{\gamma i} \times \frac{w_i}{\rho_i} \times \int \phi_t \times dV \quad (4)$$

V = volume medium (cm^3);

Q_i = laju reaksi penangkapan radiatif total untuk nuklida ke- i ($\text{reaksi}/\text{detik}$).

Besaran $\int \phi_t \times dV$ bisa dihitung menggunakan korelasi daya total reaktor dengan fluks total di dalam reaktor dengan persamaan hubungan antara fluks termal dan daya reaktor sebagai berikut[4]:

$$P = E_R \times \Sigma_f \times \int \phi_t \times dV \quad (5)$$

E_R = *recoverable energy* per pembelahan = $3,2 \times 10^{-11}$ joule;

Σ_f = tampang lintang pembelahan makroskopik bahan fisil, untuk ^{235}U Σ_f
= 0.0047 cm^{-1} ,

sehingga laju reaksi penangkapan radiatif total dalam teras reaktor untuk nuklida ke- i menjadi:

$$Q_i = \Sigma_{\gamma i} \times \frac{w_i}{\rho_i} \times P / (E_R \times \Sigma_f) \quad (6)$$

Apabila dalam satu reaksi penangkapan radiatif nuklida ke- i memancarkan sebanyak p_i (foton/reaksi penangkapan radiatif/detik)[6], maka intensitas sinar gamma menjadi:

$$K_i = Q_i \times p_i \quad (7)$$

K_i = intensitas sinar gamma dari nuklida ke- i (foton/detik);

p_i = banyaknya pancaran sinar gamma per satu tangkapan radiatif oleh nuklida ke- i .

Sinar Gamma dari Proses Reaksi Pembelahan Spontan.

Pada saat reaksi pembelahan, inti atom membelah menjadi 2 unsur hasil pembelahan dan memancarkan sinar gamma secara spontan (*prompt fission gamma rays*). Sinar gamma dari pembelahan spontan didefinisikan sebagai sinar gamma yang dipancarkan dalam kurun waktu lebih kecil dari 5×10^{-8} detik sesudah terjadinya reaksi pembelahan. Sinar gamma yang dipancarkan sesudah waktu tersebut dikategorikan sebagai sinar gamma peluruhan nuklida hasil pembelahan. Besar energi foton hasil pembelahan spontan tersebar dalam rentang energi antara 0,3 MeV sampai dengan 8 MeV[7]. Karena dalam reaktor terjadi sejumlah besar reaksi pembelahan, maka foton hasil pembelahan spontan yang dihasilkan tampak seperti spektrum energi yang kontinu. Spektrum ini kurvanya dicocokkan menjadi persamaan sebagai berikut[4,7]:

$$\kappa_n = \frac{1}{(E_n + E_{n+1})/2} \int_{E_n}^{E_{n+1}} E \times \eta(E) \times dE \tag{8}$$

dengan,

κ_n = Cacah sinar gamma per pembelahan pada energi n sampai dengan $n+1$ (foton/pembelahan)

E_n = energi sinar gamma dalam satuan MeV;

$\eta(E)$ = spektrum sinar gamma sebagai fungsi distribusi energi yang besarnya yaitu:

$$\begin{aligned} \eta(E) &= 26,0 \times e^{-2,3E} , 0,3 < E < 1 \\ &= 8,0 \times e^{-1,1E} , 1 < E < 8 \end{aligned}$$

Laju pembelahan bahan fisil dalam reaktor adalah[8]:

$$f_r = 3,125 \times 10^{16} \times P \text{ pembelahan/detik,} \tag{9}$$

Sehingga intensitas sinar gamma dari pembelahan spontan adalah:

$$K_f = \kappa_n \times f_r \tag{10}$$

K_f = intensitas sinar gamma dari hasil pembelahan spontan (foton/detik)

Sinar Gamma dari Proses Peluruhan.

Dalam teras reaktor terbentuk zat radioaktif hasil samping akibat dari proses aktivasi terhadap unsur berat yang disebut aktinida, proses pembelahan bahan fisil dan proses aktivasi terhadap material dalam teras. Neraca nuklida zat radioaktif dalam teras dirumuskan dalam persamaan sebagai berikut[9]:

$$\begin{aligned} \frac{dX}{dt} &= \sum_{j=1}^N l_{ij} \times X_j + \phi \times \sum_{k=1}^N f_{ik} \times \sigma_k \times X_k - (\lambda_i + \phi \times \sigma_i + r_i) X_i + F_i \quad i = 1 \dots N \end{aligned} \tag{11}$$

dengan:

X_i = rapat atom nuklida ke- i ;

N = jumlah jenis nuklida;

l_{ij} = fraksi peluruhan radioaktif dari nuklida lain yang mengakibatkan pembentukan nuklida ke- i ;

λ_i = tetapan peluruhan nuklida ke- i ;

ϕ = fluks neutron rerata;

f_{ik} = fraksi serapan neutron oleh nuklida lain yang mengakibatkan pembentukan nuklida ke- i ;

σ_k =ampang lintang serapan neutron nuklida ke- k ;

r_i = laju pemindahan nuklida ke- i dari sistem;

F_i = laju asupan nuklida ke- i .

Intensitas sinar gamma secara langsung dihitung menggunakan paket program ORIGEN-2[9].

METODOLOGI

Intensitas Sinar Gamma dari Proses Penangkapan Radiatif.

Menurut Grotenhuis[7], energi sinar gamma yang dipancarkan karena penangkapan radiatif untuk semua jenis atom berkisar antara 0 s/d 11 MeV. Sinar gamma ini dikelompokkan dalam 7 strata kelas energi, yaitu: 0-1 MeV (kelas energi 1), 1-2 MeV (kelas energi 2), 2-3 MeV (kelas energi 3), 3-4 MeV (kelas energi 4), 4-6 MeV (kelas energi 5), 6-8 MeV (kelas energi 6), dan 8-11 MeV (kelas energi 7) dengan pembobotan energi pada energi-energi 0,5 MeV, 1,5 MeV, 2,5 MeV, 3,5 MeV, 5 MeV, 7 MeV dan 9 MeV. Dari persamaan (7) intensitas total sinar gamma penangkapan radiatifnya menjadi:

$$K_s = \sum_{m=1}^7 \sum_{i=1}^n Q_i \times p_{im} \quad (12)$$

p_{im} = kebolehjadian terpancarnya sinar gamma penangkapan radiatif oleh nuklida i pada kelas energi ke- m pada setiap satu penangkapan radiatif. Besaran p_{im} adalah besaran yang unik oleh masing-masing nuklida.

K_s = intensitas (atau kuat sumber) sinar gamma penangkapan radiatif dalam satuan (foton/detik).

m = jumlah strata kelas energi (7 strata)

n = jumlah nuklida yang mengalami reaksi penangkapan radiatif.

Intensitas Sinar Gamma dari Proses Reaksi Pembelahan Spontan.

Diasumsikan bahwa pembangkitan energi reaktor 3400 MWt hanya berasal dari pembakaran bahan fisil ^{235}U , tidak terjadi pembangkitan energi dari pembakaran bahan fisil yang lain. Distribusi sinar gamma hasil reaksi pembelahan spontan mengikuti persamaan (8), dari persamaan ini diperoleh cacah sinar gamma per pembelahan bahan fisil ^{235}U seperti pada Tabel 1. Intensitas sinar gamma hasil pembelahannya dihitung menggunakan persamaan (10).

Tabel 1. Cacah sinar gamma rerata pada setiap kelas energi untuk setiap pembelahan.

Rentang energi (MeV)	Cacah sinar gamma setiap 1 pembelahan: κ_n (foton/pembelahan)
0.3 – 1	4,03
1 – 2	1,52
2 – 3	0,520
3 – 4	0,170
4 – 6	0,0775
6 – 8	0,00868

Intensitas Sinar Gamma dari Proses Peluruhan

Sinar gamma hasil peluruhan dalam teras reaktor dihitung dengan menggunakan paket program ORIGEN-2[9], dikelompokkan dalam 3 jenis sinar gamma berdasarkan radionuklida pemancarnya, yaitu sinar gamma peluruhan produk aktivasi, sinar gamma peluruhan aktinida dan sinar gamma peluruhan produk fisi. Diasumsikan bahwa reaktor beroperasi secara kontinu tanpa pemadaman dan pada daya tetap sehingga pembentukan dan peluruhan radionuklida di dalam teras sebagai sumber pemancar sinar gamma berlangsung secara kontinu. Sinar gamma hasil peluruhan dikelompokkan dalam 7 strata kelas energi seperti pada pengelompokan sinar gamma penangkapan radiatif.

Teras Reaktor AP1000.

Teras reaktor dimodelkan sebagai silinder dengan ukuran tinggi teras aktif = 426,7 cm dan diameter ekuivalen teras = 304 cm, berisi air pendingin reaktor dan susunan elemen bakar 157 buah (perkayaan 2,35% sebanyak 53 buah, perkayaan 3,40% 52 buah dan perkayaan 4,45% 52 buah)[1]. Material dalam teras yaitu elemen bakar dan air pendingin dihomogenkan, diperoleh komposisi material dalam teras reaktor pada awal operasi, ditunjukkan dalam Tabel 2.

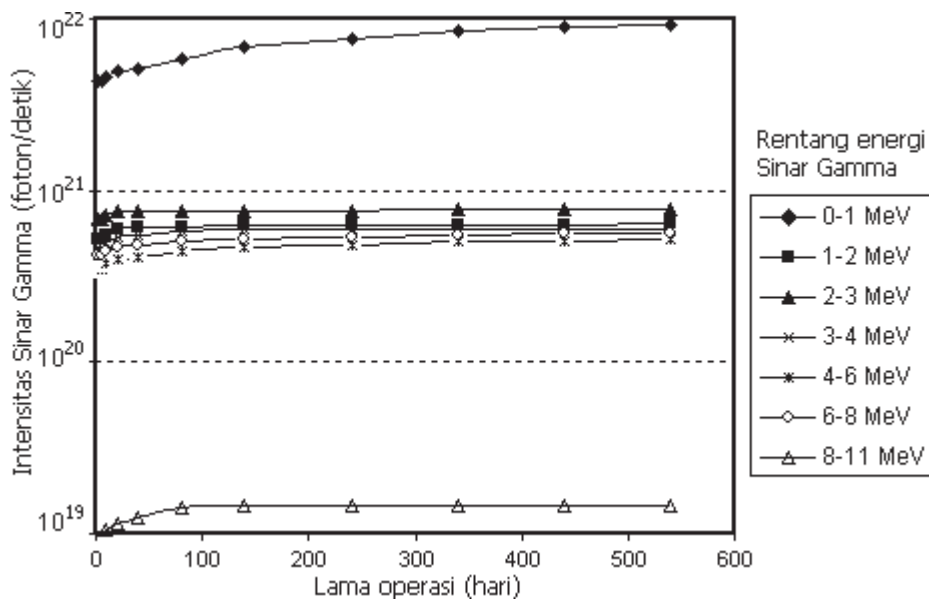
Tabel 2. Nuklida utama dalam teras AP1000 dan moda pemancaran foton gamma.

Nuklida	Berat (gram)	Moda pemancaran sinar gamma
^{238}U	81754664	Penangkapan radiatif diikuti peluruhan aktinida
Zr	19131560	penangkapan radiatif diikuti peluruhan hasil aktivasi
^{235}U	2841222	Pembelahan spontan diikuti penangkapan radiatif dan/atau peluruhan hasil fisi
H (dalam H ₂ O)	2406237	Penangkapan radiatif
O (dalam H ₂ O)	19249896	Peluruhan hasil aktivasi
Fe	453780	penangkapan radiatif diikuti peluruhan hasil aktivasi
Sn	283069	Peangkapan radiatif diikuti peluruhan hasil aktivasi
Produk fisi dan aktivasi	Tergantung lama operasi	Peluruhan aktinida, produk fisi dan produk aktivasi

HASIL DAN PEMBAHASAN

Intensitas Sinar Gamma dari Proses Penangkapan Radiatif

Persamaan (12) digunakan secara analitik untuk menghitung intensitas sinar gamma penangkapan radiatif. Pada awal operasi reaktor sinar gamma penangkapan radiatif hanya dihasilkan dari penangkapan neutron oleh nuklida awal pembentuk teras reaktor seperti pada Tabel 2. Dari hasil perhitungan dengan ORIGEN-2, diperoleh bahwa pada saat reaktor beroperasi sampai 50 hari jumlah cacah nuklida cenderung naik karena adanya tambahan radionuklida hasil aktivasi dan hasil pembelahan, mengakibatkan sinar gamma penangkapan radiatifnya bertambah. Di atas 50 hari radionuklida hasil aktivasi dan hasil pembelahan cenderung setimbang karena pertumbuhannya sebanding dengan peluruhannya, sehingga sinar gamma penangkapan radiatifnya juga konstan. Gambar 1 menunjukkan grafik kecenderungan intensitas sinar gamma penangkapan radiatif selama reaktor dioperasikan.



Gambar 1. Intensitas sinar gamma penangkapan radiatif sebagai fungsi waktu operasi reaktor

Sebagai nuklida yang mempunyai massa terbesar dalam teras, ^{238}U memberi kontribusi intensitas sinar gamma yang signifikan pada kelas-kelas energi 1, 2, 4 dan 5 sedangkan ^{56}Fe memberi kontribusi intensitas sinar gamma yang signifikan pada kelas-kelas energi 1, 2, 5, dan 6. Nuklida-nuklida ^{90}Zr , ^{91}Zr dan ^{92}Zr memberi kontribusi intensitas sinar gamma yang signifikan pada kelas-kelas energi 1 dan 2. Sementara itu reaksi antara Hidrogen dalam molekul air dengan neutron termal menjadi kontributor utama intensitas sinar gamma pada kelas energi 3. Radionuklida hasil pembelahan sebagai kontributor intensitas sinar gamma yang signifikan antara lain ^{149}Sm , ^{151}Sm , ^{150}Sm , ^{133}Cs dan ^{145}Nd .

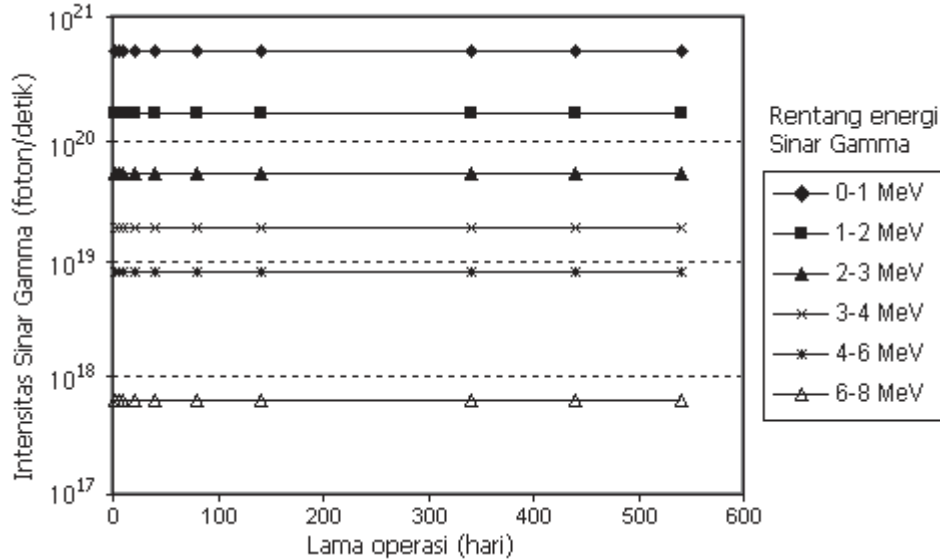
Pada kelas energi 1 dan kelas energi 6 grafik intensitas sinar gamma cenderung mengalami kenaikan karena disumbang oleh sinar gamma hasil penangkapan radiatif dari ^{239}Pu . Karena umur paruh ^{239}Pu cukup panjang, maka cacah nuklida tersebut semakin bertambah dan ^{239}Pu memberikan kontribusi foton tangkapan radiatif yang menaik seiring dengan waktu pengoperasian reaktor.

Intensitas kelas energi 1 cukup tinggi dibanding dengan kelas energi lainnya karena pancaran sinar gamma per satu tangkapan radiatif ^{238}U (^{238}U sebagai kontributor utama) p-kelas-energi-1 adalah 4,42 jauh lebih tinggi dibanding p-kelas-energi yang lain, yang terbesar sesudah p-kelas-energi-1 adalah p-kelas-energi-4 yaitu 0,43. Intensitas sinar gamma kelas energi 7 jauh lebih rendah dari intensitas gamma kelas energi lainnya karena hanya beberapa nuklida menghasilkan foton gamma pada kelas energi tersebut antara lain ^{54}Fe ($p = 1,15$), ^{77}Se ($p = 0,26$). Dikombinasikan dengan rapat massanya dalam teras reaktor yang tidak dominan, maka intensitas gamma pada kelas energi tersebut lebih kecil sampai dua orde dibanding dengan intensitas gamma kelas energi lainnya.

Intensitas Sinar Gamma dari Proses Pembelahan Spontan

Dengan asumsi bahwa reaktor dioperasikan pada daya tetap maka laju pembelahan dalam teras reaktor dianggap tetap sehingga intensitas sinar gamma hasil pembelahannya juga tetap, tidak terpengaruh oleh waktu operasi. Kelas energi sinar gamma hasil

pembelahan spontan hanya sampai kelas 6 karena energi maksimum sinar gamma hasil pembelahan spontan hanya 8 MeV. Laju pembelahan bahan fisil dalam reaktor seperti pada persamaan (9) pada daya reaktor 3400 MWt adalah $1,07 \times 10^{20}$ pembelahan/detik. Angka laju pembelahan ini dikalikan dengan cacah foton/pembelahan dalam Tabel 1 menghasilkan intensitas sinar gamma dalam teras reaktor seperti pada Gambar 2. Distribusi intensitas antar kelas energi dari kelas energi 1 sampai dengan kelas energi 6 cukup seimbang yaitu antara orde 5×10^{17} foton/detik sampai dengan 6×10^{20} foton/detik.



Gambar 2: Intensitas sinar gamma hasil pembelahan spontan

Radionuklida Pemancar Sinar Gamma Peluruhan Dalam Teras.

Radionuklida yang terbentuk dalam teras reaktor dan intensitas foton gamma hasil peluruhannya dihitung menggunakan paket program ORIGEN-2. Simulasi pembakaran material teras reaktor oleh neutron termal dengan program ini menghasilkan radionuklida-radionuklida yang terdiri dari radionuklida aktinida (hasil aktivasi unsur transuranium), radionuklida hasil pembelahan bahan fisil dan radionuklida hasil aktivasi, disajikan dalam Tabel 3.

Tabel 3. Aktivitas radionuklida dalam teras PLTN AP1000.

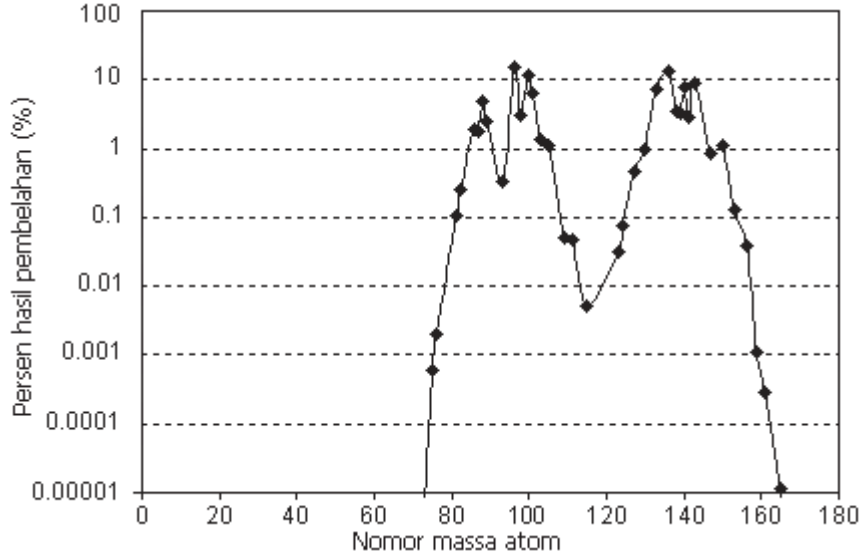
Nuklida	Aktivitas (curie)			Nuklida	Aktivitas (curie)		
	Waktu operasi				Waktu operasi		
	10 hari	240 hari	540 hari		10 hari	240 hari	540 hari
1. Peluruhan Aktinida							
²³⁹ U	$4,24 \times 10^8$	$4,79 \times 10^8$	$5,68 \times 10^8$	²³⁹ Pu	$2,30 \times 10^2$	$7,11 \times 10^3$	$1,19 \times 10^4$
²³⁹ Np	$4,00 \times 10^8$	$4,81 \times 10^8$	$5,68 \times 10^8$	²⁴² Cm	$3,02 \times 10^5$	$6,15 \times 10^2$	$3,42 \times 10^3$
²³⁷ U	$1,85 \times 10^4$	$1,28 \times 10^6$	$3,08 \times 10^6$	²⁴⁰ Pu	2,04	$1,97 \times 10^3$	$7,74 \times 10^3$
²³⁸ Np	$1,13 \times 10^1$	$5,85 \times 10^4$	$2,03 \times 10^5$	²³⁸ U	$3,38 \times 10^1$	$3,37 \times 10^1$	$3,36 \times 10^1$
^{240M} Np	$3,61 \times 10^4$	$1,18 \times 10^5$	$1,73 \times 10^5$	²³⁵ U	6,62	4,65	2,52
²⁴⁰ Np	$3,87 \times 10^4$	$5,29 \times 10^4$	$6,41 \times 10^4$	²⁰⁸ Tl	$1,16 \times 10^7$	$1,32 \times 10^4$	$6,08 \times 10^4$

2. Peluruhan hasil pembelahan							
⁹⁴ Rb	4,88×10 ⁷	4,88×10 ⁷	4,88×10 ⁷	¹³⁶ I	5,62×10 ⁷	5,62×10 ⁷	5,62×10 ⁷
⁹² Rb	1,38×10 ⁸	1,38×10 ⁸	1,38×10 ⁸	⁹¹ Sr	1,67×10 ⁸	1,67×10 ⁸	1,67×10 ⁸
⁹⁰ Rb	1,37×10 ⁸	1,37×10 ⁸	1,37×10 ⁸	¹³² I	1,06×10 ⁸	1,06×10 ⁸	1,06×10 ⁸
⁸⁸ Br	7,17×10 ⁷	7,17×10 ⁷	7,17×10 ⁷	¹³⁵ Te	9,22×10 ⁷	9,22×10 ⁷	9,22×10 ⁷
^{90M} Rb	2,83×10 ⁷	2,83×10 ⁷	2,83×10 ⁷	⁸⁸ Rb	1,04×10 ⁸	1,04×10 ⁸	1,04×10 ⁸
⁸⁹ Kr	1,32×10 ⁸	1,32×10 ⁸	1,32×10 ⁸	¹⁴¹ Ba	1,66×10 ⁸	1,66×10 ⁸	1,66×10 ⁸
¹⁴² La	1,68×10 ⁸	1,68×10 ⁸	1,68×10 ⁸	^{132M} Sb	2,97×10 ⁷	2,97×10 ⁷	2,97×10 ⁷
¹⁰⁴ Tc	5,17×10 ⁷	5,17×10 ⁷	5,17×10 ⁷	⁹² Kr	4,36×10 ⁷	4,36×10 ⁷	4,36×10 ⁷
¹³⁶ I	8,59×10 ⁷	8,59×10 ⁷	8,59×10 ⁷	⁹⁶ Y	1,70×10 ⁸	1,70×10 ⁸	1,70×10 ⁸
⁸⁹ Rb	1,37×10 ⁸	1,37×10 ⁸	1,37×10 ⁸	¹³⁷ Xe	1,70×10 ⁸	1,70×10 ⁸	1,70×10 ⁸
¹³⁹ Cs	1,83×10 ⁸	1,83×10 ⁸	1,83×10 ⁸	¹⁰¹ Zr	9,71×10 ⁷	9,71×10 ⁷	9,71×10 ⁷
¹³⁸ Cs	1,92×10 ⁸	1,92×10 ⁸	1,92×10 ⁸	¹³⁴ Te	1,92×10 ⁸	1,92×10 ⁸	1,92×10 ⁸
¹³⁹ Xe	1,46×10 ⁸	1,46×10 ⁸	1,46×10 ⁸	⁹⁸ Nb	1,64×10 ⁸	1,64×10 ⁸	1,64×10 ⁸
⁸⁸ Kr	1,03×10 ⁸	1,03×10 ⁸	1,03×10 ⁸	¹⁰² Tc	1,19×10 ⁸	1,19×10 ⁸	1,19×10 ⁸
¹³⁸ Xe	1,78×10 ⁸	1,78×10 ⁸	1,78×10 ⁸	⁹² Y	1,71×10 ⁸	1,71×10 ⁸	1,71×10 ⁸
⁹⁰ Kr	1,30×10 ⁸	1,30×10 ⁸	1,30×10 ⁸	¹³³ Xe	1,22×10 ⁸	1,22×10 ⁸	1,22×10 ⁸
¹⁰¹ Mo	1,43×10 ⁸	1,43×10 ⁸	1,43×10 ⁸	⁹⁷ Nb	1,67×10 ⁸	1,67×10 ⁸	1,67×10 ⁸
⁸⁷ Kr	7,32×10 ⁷	7,32×10 ⁷	7,32×10 ⁷	⁹⁷ Zr	1,66×10 ⁸	1,66×10 ⁸	1,66×10 ⁸
¹³¹ Sb	7,14×10 ⁷	7,14×10 ⁷	7,14×10 ⁷	¹³⁹ Ba	1,83×10 ⁸	1,83×10 ⁸	1,83×10 ⁸
¹⁴⁰ La	5,94×10 ⁷	1,50×10 ⁸	1,50×10 ⁸	⁹³ Y	1,84×10 ⁸	1,84×10 ⁸	1,84×10 ⁸
^{133M} Te	8,65×10 ⁷	8,65×10 ⁷	8,65×10 ⁷	¹³³ I	1,92×10 ⁸	1,92×10 ⁸	1,92×10 ⁸
¹³⁵ I	1,79×10 ⁸	1,79×10 ⁸	1,79×10 ⁸	¹⁴³ Ce	1,67×10 ⁸	1,67×10 ⁸	1,67×10 ⁸
⁹⁴ Y	1,78×10 ⁸	1,78×10 ⁸	1,78×10 ⁸	^{99M} Tc	1,38×10 ⁸	1,38×10 ⁸	1,38×10 ⁸
⁹² Sr	1,70×10 ⁸	1,70×10 ⁸	1,70×10 ⁸	¹⁴⁴ Pr	3,93×10 ⁶	6,67×10 ⁷	9,52×10 ⁷
¹³⁴ I	2,16×10 ⁸	2,16×10 ⁸	2,16×10 ⁸	¹³² Sb	4,64×10 ⁷	4,64×10 ⁷	4,64×10 ⁷
¹⁴² Ba	1,65×10 ⁸	1,65×10 ⁸	1,65×10 ⁸	^{97M} Nb	1,57×10 ⁸	1,57×10 ⁸	1,57×10 ⁸
3. Peluruhan hasil aktivasi							
⁹⁵ Zr	1,39×10 ⁵	1,42×10 ⁶	1,82×10 ⁶	^{119M} Sn	9,52×10 ²	1,91×10 ⁴	3,34×10 ⁴
⁹⁵ Nb	1,30×10 ⁴	1,30×10 ⁶	1,81×10 ⁶	¹²⁵ Sb	4,40×10 ²	1,13×10 ⁴	2,52×10 ⁴
⁵⁵ Fe	2,87×10 ⁴	7,22×10 ⁵	1,73×10 ⁶	^{95M} Nb	5,46×10 ²	9,96×10 ³	1,27×10 ⁴
¹²¹ Sn	3,97×10 ⁵	4,53×10 ⁵	5,73×10 ⁵	^{117M} Sn	3,02×10 ³	8,81×10 ³	1,61×10 ⁴
⁵⁹ Fe	1,44×10 ⁴	1,13×10 ⁵	1,40×10 ⁵	⁵⁶ Mn	3,78×10 ⁰	2,66×10 ³	1,81×10 ⁴
⁹⁷ Zr	6,60×10 ⁴	7,51×10 ⁴	8,89×10 ⁴	¹²⁵ Sn	1,01×10 ³	2,24×10 ³	2,57×10 ³
⁹⁷ Nb	6,60×10 ⁴	7,51×10 ⁴	8,89×10 ⁴	^{125M} Te	3,49×10 ¹	1,07×10 ⁴	4,57×10 ⁴
¹²³ Sn	3,80×10 ³	5,99×10 ⁴	9,25×10 ⁴	^{123M} Sn	1,14	1,30	1,53
^{113M} In	4,10×10 ³	6,10×10 ⁴	9,09×10 ⁴		4,97×10 ⁻²	2,94×10 ²	1,76×10 ³
¹¹³ Sn	4,10×10 ³	6,10×10 ⁴	9,09×10 ⁴	¹²⁴ Sb	6,72	4,14×10 ²	9,01×10 ²
^{125M} Sn	6,39×10 ⁴	7,27×10 ⁴	8,61×10 ⁴	¹²² Sb	7,06×10 ⁻¹	8,03×10 ¹	1,14×10 ²
^{97M} Nb	6,24×10 ⁴	7,10×10 ⁴	8,41×10 ⁴	⁹⁶ Nb	6,26×10 ⁻¹	5,54×10 ³	4,65×10 ⁴
^{113M} Sn	3,07×10 ⁴	3,49×10 ⁴	3,84×10 ⁴	⁶⁰ Co	4,78×10 ⁻¹³	1,49×10 ⁻¹¹	4,12×10 ⁻¹¹
				¹⁵ C			

Proses pembelahan bahan fisil menghasilkan 834 radinuklida. Dari jumlah itu sebanyak 52 nuklida yang terdapat dalam Tabel 3 merupakan kontributor 90% intensitas sinar gamma peluruhan hasil pembelahan, dengan rentang aktivitas masing-masing

radionuklida antara $2,80 \times 10^7$ curie s/d $1,92 \times 10^8$ curie. Radionuklida aktinida dan radionuklida aktivasi yang terdapat dalam Tabel 3 merupakan kontributor hampir 100% sinar gamma peluruhan aktinida dan sinar gamma peluruhan aktivasi.

Distribusi radionuklida hasil pembelahan disajikan dalam Gambar 3. Radionuklida-radionuklida hasil pembelahan ini mempunyai massa atom antara 65 sampai dengan 180. Puncak distribusi tidak di radionuklida bermassa atom sekitar 112, yang merupakan seperdua dari massa atom bahan fissil ^{235}U , tetapi pada nuklida dengan massa sekitar 95 dan 135. Ketidak simetrisan ini sesuai dengan konsep konfigurasi nuklida paling stabil pada hasil reaksi pembelahan ^{235}U [8].

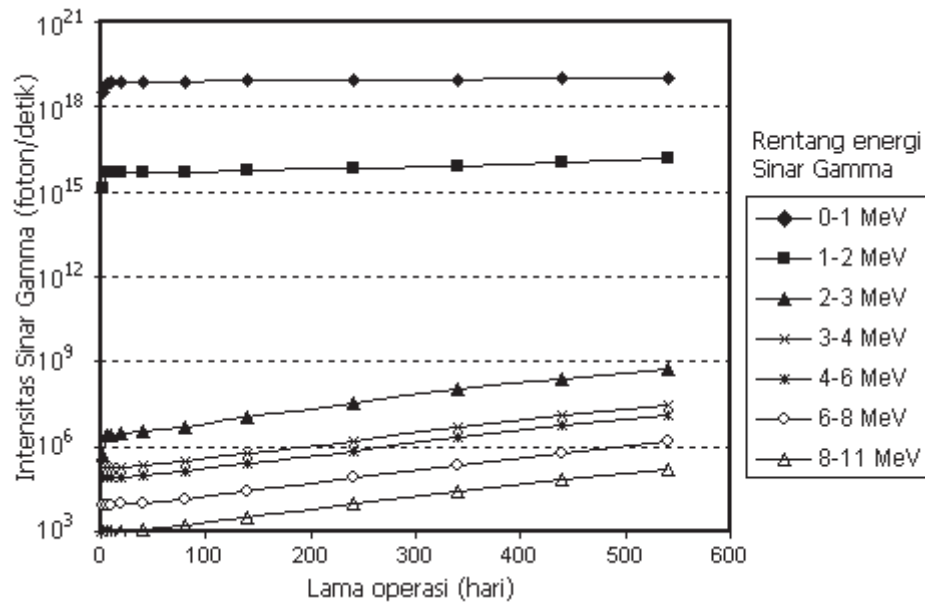


Gambar 3. Distribusi radionuklida hasil pembelahan

Cacah atom hasil pembelahan ^{235}U bermassa ~ 118 ($\frac{1}{2}$ massa ^{236}U) minimum karena tenaga ikat total ^{236}U hasil reaksi $^{235}\text{U} + \text{neutron termal}$ tidak cukup untuk membentuk 2 atom bermassa ~ 118 , sehingga yang terbentuk adalah 2 atom yang jumlah tenaga ikat totalnya masih bisa dicukupi oleh tenaga ikat total ^{236}U hasil reaksi di atas, biasa disebut asimetris. Apabila energi neutronnya cukup tinggi sehingga tenaga ikat total hasil reaksi mencukupi, dimungkinkan untuk terbentuknya lebih banyak atom bermassa ~ 118 .

Intensitas Sinar Gamma Peluruhan Aktinida.

Gambar 4 menunjukkan grafik intensitas sinar gamma peluruhan aktinida. Sinar gammanya berasal dari peluruhan aktinida yang terbentuk dari tangkapan neutron oleh ^{238}U dan aktinida hasil bentukannya (multiple neutron capture[10]) yaitu aktinida-aktinida ^{239}U , ^{238}Np , ^{239}Np , ^{240}Np , ^{240}Pu dan ^{242}Cm , ^{237}U , ^{240}MNp , ^{242}Cm , ^{240}Pu , ^{208}Tl . Kontributor utama intensitas sinar gamma pada kelas energi 1 dan kelas energi 2 adalah ^{239}Np dan ^{239}U . Kontributor utama pada kelas energi 3 adalah ^{240}Pu , ^{242}Cm dan ^{208}Tl . Kontributor utama pada kelas energi 4 sampai kelas energi 7 adalah ^{240}Pu dan ^{242}Cm .



Gambar 4. Intensitas sinar gamma hasil peluruhan aktinida sebagai fungsi waktu operasi reaktor

Intensitas pada kelas energi 1 mencapai orde 10^{19} foton/s, sedangkan intensitas pada kelas energi lainnya sangat rendah. Intensitas pada kelas energi 2 hanya pada orde 10^{15} foton/s, bahkan intensitas kelompok berikutnya maksimum hanya pada orde 107 foton /detik. Secara keseluruhan intensitas sinar gamma dari peluruhan aktinida menunjukkan grafik menaik seiring dengan waktu beroperasinya reaktor karena cacah aktinida pemancar sinar gammanya juga mengalami kenaikan seiring dengan bertambahnya waktu operasi reaktor.

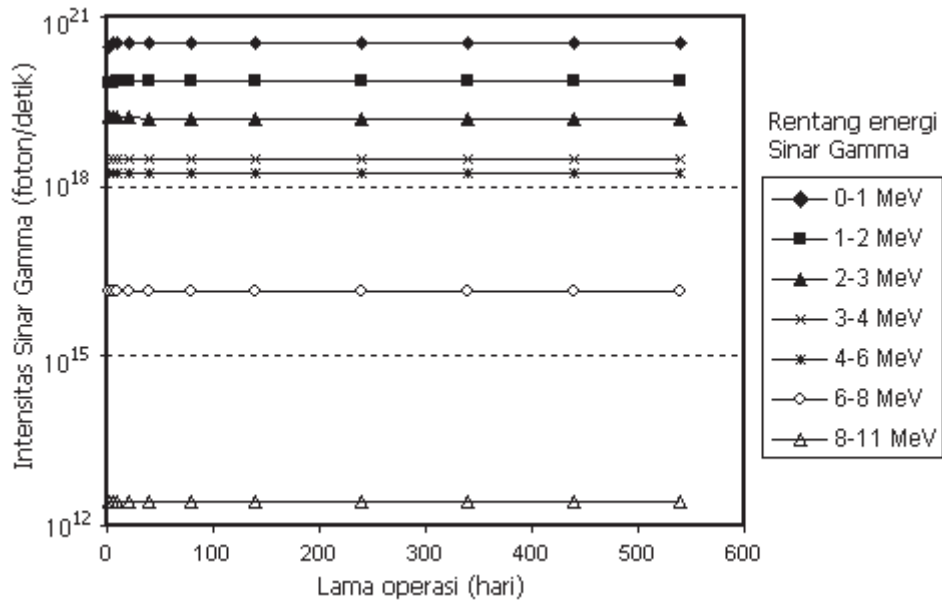
Kontributor utama intensitas sinar gamma pada kelas energi 1 dan kelas energi 2 adalah ^{239}Np dan ^{239}U . Karena kedua nuklida ini berumur pendek, ^{239}Np (2,355 hari), ^{239}U (23.54 menit) maka aktivitasnya mendekati jenuh sehingga gradient intensitas sinar gammanya kecil. Kontributor utama intensitas sinar gamma pada kelas energi 3 sampai dengan kelas energi 7 adalah ^{242}Cm (162,8 hari) dan ^{240}Pu (6570 tahun). Karena berumur panjang maka aktivitasnya masih jauh dari kejenuhan sehingga gradient intensitas sinar gammanya cukup besar dibanding gradient intensitas pada kelas energi 1 dan energi 2.

Intensitas Sinar Gamma Peluruhan Radionuklida Hasil Pembelahan

Hampir semua aktivitas radionuklida hasil peluruhan yang memberi kontribusi intensitas sinar gamma sudah mencapai kesetimbangan dalam selang waktu yang pendek sesudah reaktor beroperasi. Hanya sedikit radionuklida yang aktivitasnya meningkat seiring dengan waktu operasi reaktor antara lain ^{140}La dan ^{144}Pr . Hal ini mengakibatkan intensitas sinar gamma juga stabil, seperti ditunjukkan dalam Gambar 5.

Terdapat 78 radionuklida kontributor sinar gamma pada kelas energi 1. Intensitas dari masing-masing radionuklida bervariasi antara 2×10^{17} foton/detik - 21×10^{19} foton/detik. Ada 14 radionuklida yang memberi kontribusi intensitas > dari 10^{19} foton/s, yaitu ^{134}I , ^{96}Y , ^{92}Rb , ^{94}Y , ^{139}Xe , ^{101}Zr , ^{134}Te , ^{137}Xe , ^{98}Nb , ^{101}Mo , ^{141}Ba , ^{135}Te , ^{139}Cs dan ^{138}Cs . Untuk kelas energi 2 terdapat 33 radionuklida kontributor, dengan variasi intensitas antara 1×10^{17} foton/detik - 6×10^{18} foton/detik. Ada 16 radionuklida yang memberi intensitas > 10^{18} foton/s yaitu: ^{140}La , ^{138}Cs , ^{135}I , ^{92}Sr , ^{88}Kr , ^{89}Rb , ^{134}I , ^{136}I , ^{142}Ba , ^{101}Mo , ^{90}Kr , ^{142}La , ^{136}M , ^{89}Kr , ^{91}Sr dan ^{94}Y . Terdapat 12 radionuklida kontributor sinar gamma kelas energi

3 dengan variasi intensitas 1×10^{17} foton/detik - 3×10^{18} foton/detik, yaitu: ^{138}Xe , $^{133\text{M}}\text{Te}$, ^{104}Tc , ^{131}Sb , ^{88}Rb , ^{142}La , ^{140}La , ^{87}Kr , ^{135}I , ^{138}Cs , ^{88}Br dan ^{94}Y . Untuk kelas energi 4 terdapat 14 radionuklida kontributor, dengan variasi intensitas antara 2×10^{16} foton/detik - 6×10^{17} foton/detik yaitu: ^{90}Rb , ^{142}La , ^{89}Kr , ^{88}Br , $^{90\text{M}}\text{Rb}$, ^{84}Br , ^{104}Tc , ^{89}Rb , ^{92}Rb , ^{136}I , ^{139}Cs , ^{138}Cs , ^{94}Rb dan ^{139}Xe . Untuk kelas energi 5 terdapat 5 radionuklida kontributor, dengan variasi intensitas antara 2×10^{16} foton/detik - 7×10^{17} foton/detik yaitu ^{90}Rb , ^{88}Br , ^{92}Rb , $^{90\text{M}}\text{Rb}$ dan ^{89}Kr . Untuk kelas energi 6 terdapat 2 radionuklida kontributor, yaitu ^{92}Rb dengan intensitas $8,7 \times 10^{15}$ foton/detik dan ^{94}Rb dengan intensitas $4,8 \times 10^{14}$ foton/detik. Untuk kelas energi 7 hanya ada satu kontributor yaitu ^{94}Rb dengan intensitas $1,7 \times 10^{12}$ foton/detik.



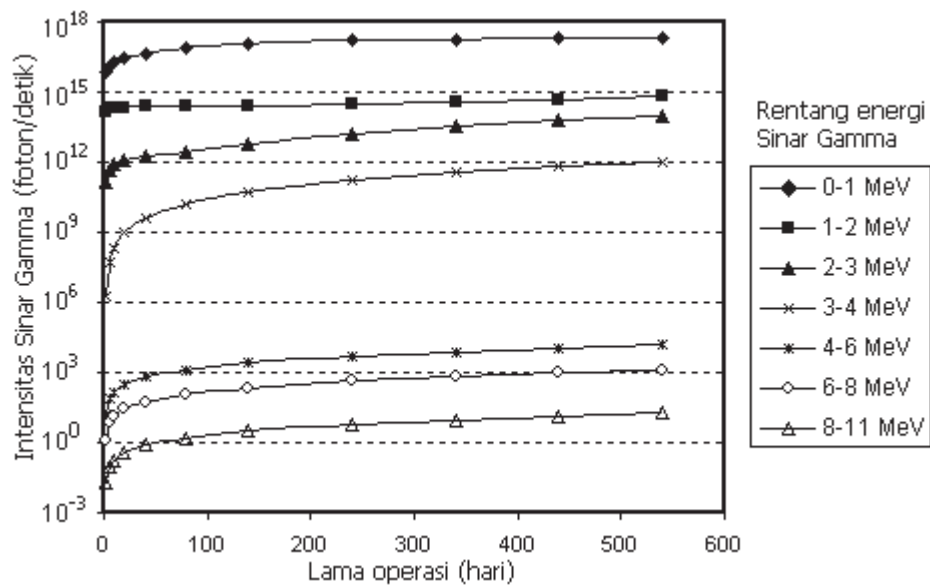
Gambar 5. Intensitas sinar gamma peluruhan hasil pembelahan

Intensitas Sinar Gamma Peluruhan Radionuklida Hasil Aktivasi

Sumber utama sinar gamma hasil peluruhan aktivasi adalah peluruhan hasil aktivasi neutron terhadap material dalam teras reaktor yang meliputi aktivasi material awal maupun material hasil pembelahan.

Pemancar sinar gamma kelas energi 1 adalah radionuklida ^{95}Nb dan ^{95}Zr , ^{97}Nb , ^{97}Zr , $^{97\text{M}}\text{Nb}$ memberi kontribusi pada intensitas orde 10^{16} foton/detik. Untuk kelas energi 2 adalah ^{97}Zr dan ^{56}Mn pada orde 10^{14} foton/detik. Untuk kelas energi 3 dan 4 radionuklida ^{56}Mn pada orde 10^{13} foton/detik dan 10^{11} foton/detik. Untuk kelas energi 5,6 dan 7 intensitas sinar gammanya sangat kecil, di bawah orde 10^6 foton/s, ini adalah sumbangan dari ^{15}C . Gambar 6 menunjukkan grafik intensitas sinar gamma dari peluruhan hasil aktivasi.

Intensitas sinar gamma dari peluruhan hasil aktivasi juga cenderung menaik pada awal operasi kemudian cenderung flat walaupun masih naik secara lambat. Ini karena konsentrasi radionuklida hasil-hasil aktivasi pada awalnya naik kemudian menuju ke arah setimbang karena laju pertumbuhannya sebanding dengan laju peluruhannya seiring dengan bertambahnya waktu operasi reaktor.



Gambar 6. Intensitas sinar gamma dari peluruhan hasil aktivasi

Kontributor utama intensitas sinar gamma pada kelas energi 2 adalah ^{97}Zr . Aktivitas nuklida ini mendekati tingkat jenuh pada orde 10^4 curie seperti terlihat dalam Tabel 3, sehingga grafiknya seperti konstan. Kontributor utama intensitas sinar gamma pada kelas lainnya, yaitu kelas energi 1 adalah ^{95}Nb , yaitu kelas energi 3 dan 4 adalah ^{56}Mn , kelas energi 5, 6 dan 7 adalah ^{15}C aktivitasnya belum mendekati tingkat jenuh sehingga intensitas sinar gammanya cenderung mengalami kenaikan.

KESIMPULAN

Dari sejumlah 834 radionuklida hasil pembelahan 52 radionuklida menyumbang lebih dari 90% intensitas sumber gamma peluruhan hasil pembelahan, sisanya hanya menyumbang < 10% intensitas sinar gamma peluruhan hasil pembelahan. Intensitas sinar gamma terbesar dalam teras reaktor adalah intensitas gamma yang berasal dari reaksi penangkapan radiatif diikuti oleh intensitas gamma yang berasal dari reaksi pembelahan bahan fisil dalam kajian ini adalah ^{235}U , kemudian intensitas gamma yang berasal dari peluruhan. Kadar intensitas gamma dari proses penangkapan radiatif dan proses pembelahan dapat dikatakan seimbang, sedangkan kadar intensitas gamma hasil peluruhan jauh lebih kecil daripada kadar intensitas gamma dari proses penangkapan radiatif dan proses pembelahan. Baik di dalam proses penangkapan radiatif, proses pembelahan spontan maupun dalam proses peluruhan, intensitas sinar gamma kelas energi rendah lebih besar dibanding dengan intensitas sinar gamma kelas energi tinggi

DAFTAR PUSTAKA

1. AP1000 European Design Control Document, 2009, Westinghouse Electric Company LLC, EPS-GW-GL-700; 2009.

2. Sterbentz, J.W. Calculated neutron and gamma rays spectra. 13th International Symposium on Reactor Dosimetry, INL/CON-08-13845; 2002.
3. Martin A., Harbison S.A. An introduction to radiation protection. 5th ed.. ISBN 10-0340885432; 2006
4. Lamarsh, J.R. Introduction to nuclear engineering. Addison Wesley Publishing Company, Inc. Reading massachussetts, U.S.A; 1983.
5. Reactor Physics, CNSC. Science and reactor fundamentals- reactor physics. Technical Training Group, CANDU, Revision 1 – January 2003. canteach.candu.org/library/20030101.pdf
6. Tuli J.K. Thermal neutron capture gamma-rays. National Nuclear Data Center, Brookhaven National Laboratory, Upton, N.Y. 11973, U.S.A; 1999.
7. Jaeger, R.G., Blizard, A.P., Chilton, A.B. Engineering compendium on radiation shielding. Springer, ISBN-10: 0387040803; 1968.
8. Lamarsh, J.R. Introduction to nuclear reactor theory. American Nuclear Society, ASIN/ISBN 0894480405; 2002.
9. Ludwig, S.B., Croft, A.G. ORIGEN-2-2 isotope generation and depletion code-matrix exponential method. OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, Oak Ridge, Tennessee 37830; 2002.
10. Adamskii, V.B., et al. Multiple neutron capture by U, Am, Tm, and Au isotopes in a flux of thermalized neutrons from a nuclear explosion in the zond experiment. Atomic Energy, Vol 81 No. 3 651-655, DOI: 10.1007/BF02407059; 1996. Available from <http://www.springerlink.com/index/B668423K367LR743.pdf>