

DESAIN TERAS REAKTOR RISET INOVATIF (RRI). ESTIMASI DAN ANALISIS DISTRIBUSI PANAS GAMMA

Setiyanto

Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir – BATAN

Kawasan PUSPIPTEK Gedung No 80. Serpong - 15310

Email: setia@batan.go.id

Diterima editor 2 September 2014

Disetujui untuk publikasi 3 Oktober 2014

ABSTRAK

DESAIN TERAS REAKTOR RISET INOVATIF (RRI). ESTIMASI DAN ANALISIS DISTRIBUSI PANAS GAMMA. Panas gamma merupakan faktor yang sangat diperlukan untuk analisis keselamatan pada setiap fasilitas eksperimen yang akan dilakukan di teras reaktor nuklir. Panas gamma merupakan sumber panas internal yang harus dihitung dengan tepat, karena berkaitan dengan masalah keselamatan. Nilai panas gamma sangat bergantung pada karakteristik teras reaktor secara keseluruhan, sehingga setiap desain teras baru harus dilengkapi dengan penentuan nilai distribusi panas gammanya. Reaktor Riset Inovatif (RRI) merupakan reaktor riset desain baru yang harus dilengkapi dengan data keselamatannya, termasuk dalam hal ini nilai dan distribusi panas gammanya. Untuk keperluan tersebut, telah dilakukan perhitungan dan analisis distribusi panas gamma teras dan fasilitas iradiasi reflektor RRI dengan menggunakan program Gamset yang telah dimodifikasi dan divalidasi untuk model teras RRI. Diperoleh hasil bahwa di pusat teras reaktor memiliki nilai panas gamma yang cukup tinggi (11,75 W/g), jauh lebih besar dari reaktor RSG-GAS. Akan tetapi penempatan semua fasilitas iradiasi di reflektor menunjukkan bahwa desain RRI jauh lebih aman untuk iradiasi dibanding dengan di RSG-GAS, karena memiliki panas gamma di reflektor yang sangat rendah. Disimpulkan bahwa berdasarkan nilai panas gamma di reflektor yang sangat rendah, desain teras reaktor RRI lebih aman untuk penggunaan berbagai jenis iradiasi.

Kata kunci: Panas gamma, reaktor nuklir, reaktor riset, keselamatan reaktor.

ABSTRACT

INNOVATIVE RESEARCH REACTOR CORE DESIGN. ESTIMATION AND ANALYSIS OF GAMMA HEATING DISTRIBUTION. The Gamma heating value is an important factor needed for safety analysis of each experiments that will be realized on research reactor core. Gamma heat is internal heat source occurs in each irradiation facilities or any material irradiated in reactor core. This value should be determined correctly because of the safety related problems. The gamma heating value is in general depend on reactor core characteristics, different one and other, and then each new reactor design should be completed by gamma heating data. The Innovative Research Reactor is one of the new reactor design that should be completed with any safety data, including the gamma heating value. For this reasons, calculation and analysis of gamma heating in the hole of reactor core and irradiation facilities in reflector had been done by using of modified and validated Gamset computer code. The result shown that gamma heating value of 11.75 W/g is the highest value at the center of reactor core, higher than gamma heating value of RSG-GAS. However, placement of all irradiation facilities in reflector show that safety characteristics for irradiation facilities of innovative research reactor more better than RSG-GAS reactor. Regarding the results obtained, and based on placement of irradiation facilities in reflector, can be concluded that innovative research reactor more safe for any irradiation used.

Keyword: gamma heating, nuclear reactor, research reactor, reactor safety

PENDAHULUAN

Desain konseptual Reaktor Riset Inovatif (RRI) adalah salah satu program unggulan Batan tahun 2010-2014. Desain konseptual teras sudah dilakukan, dan salah satu faktor yang harus dilengkapi dalam desain tersebut adalah estimasi nilai dan distribusi panas gamma di teras reaktor. Program GAMSET adalah salah satu program yang dapat digunakan untuk menghitung panas gamma tersebut, terutama untuk jenis teras seperti RSG-GAS[1]. Keakuratan hasil perhitungan Gamset dibandingkan dengan hasil pengukuran untuk teras RSG telah terbukti dengan baik (rata-rata 97 %) [1]. Teras RRI memiliki bentuk bahan bakar dan konfigurasi teras yang mirip RSG-GAS, sehingga program Gamset dapat digunakan untuk menghitung panas gammanya. Pemisahan teras dengan reflektor menggunakan tabung Al-Aloy dan penggunaan jenis bahan bakar UMo, memerlukan modifikasi geometri dan penambahan pustakan data untuk elemen bakar pada program Gamset. Modifikasi dan penambahan pustaka data telah berhasil dilakukan dengan baik[2], sehingga kegiatan dapat diteruskan pada perhitungan dan analisis pembangkitan panas gamma teras RRI.

Panas gamma (*gamma heating*) di teras reaktor merupakan salah satu faktor yang berkaitan dengan keselamatan operasi, terutama pada fasilitas iradiasi dan bahan yang diiradiasi. Bahan tersebut akan terpapar radiasi gamma dan neutron, sehingga di dalam dirinya akan timbul panas yang kuantitasnya harus diketahui dengan baik agar dapat ditentukan cara pembuangannya. Panas gamma merupakan data utama dalam pembuatan analisis keselamatan setiap fasilitas iradiasi baru. Kelalaian memprediksi nilai panas gamma dan neutron dapat berakibat pada *over heating* pada bahan tersebut [3]. Para desainer reaktor perlu memperhatikan bahwa keselamatan teras reaktor riset sangat dipengaruhi oleh panas gamma dalam bahan yang diiradiasi [4,5].

Untuk mendukung dan melengkapi data keselamatan teras tersebut, maka penentuan panas gamma harus dilakukan, sehingga para pengguna reaktor akan mengetahui berapa kuantitas sumber panas internal yang berasal dari radiasi gamma tersebut harus diperhitungkan dalam pembuatan analisis keselamatannya [5].

Berdasarkan hasil desain neutronik, salah satu teras alternatif yang unggulan untuk reaktor RRI adalah teras rektanguler dengan 20 elemen bakar aktif (empat diantaranya adalah elemen kendali), diletakkan di dalam tabung/silinder Al-Aloy. Di luar tabung diberikan reflektor D₂O sekaligus merupakan posisi semua fasilitas iradiasi ditempatkan [6,7,8].

Perbedaan utama dengan reaktor RSG-GAS adalah bahwa semua fasilitas iradiasi berada di luar teras, terdapat tabung Al-Aloy, perubahan jenis bahan bakar dan RRI akan dioperasikan pada daya 50 MW, jauh lebih tinggi dibanding daya reaktor RSG-GAS. Kondisi dan perbedaan karakteristik teras inilah yang membuat reaktor tersebut memiliki parameter keselamatan dan karakteristik yang berbeda dengan yang lain, sehingga harus ditentukan secara independen, terlebih teras RRI ini termasuk jenis baru di dunia dan belum pernah dimiliki di Indonesia [4]. Perhitungan panas gamma dilakukan dengan menggunakan program Gamset yang telah dimodifikasi dan divalidasi untuk model teras RRI.

TEORI

Program Gamset adalah program yang didedikasikan untuk menghitung panas gamma di setiap titik di teras reaktor riset. Teras dimodelkan sebagai susunan matrik rektanguler, dimana setiap komponen matrik berukuran sama dengan penampang elemen bakar (8,1 cm x 7,71 cm). Untuk teras RRI yang memiliki reflektor D₂O, ukuran matrik diperluas sampai dengan 20 x 20 agar mampu menjangkau seluruh daerah reflektor. Terdapat tiga jenis sumber gamma yang diperhitungkan dalam Gamset, yaitu pertama, sumber gamma hasil reaksi pembelahan pada bahan bakar, dalam hal ini setiap elemen bakar dimodelkan sebagai sumber garis. Ke-dua, gamma yang berasal dari reaksi tangkapan neutron oleh material di fasilitas iradiasi, dan ketiga gamma reaksi auto-iradiasi di dalam material yang ditentukan panas gammanya. Semua gamma dari ketiga sumber tersebut diasumsikan merambat mengikuti hukum atenuasi linier.

Persamaan dasar yang digunakan adalah persamaan atenuasi linier, dimana bagian gamma yang diserap oleh bahan ditransformasikan menjadi panas persatuan masa bahan. Berdasarkan hukum atenuasi linier, jika foton gamma dengan intensitas I_0 γ/s menembus bahan setebal x cm, maka intensitasnya akan berkurang menjadi [8,9]:

$$I = I_0 \cdot \left\{ \exp \left[- \left(\frac{\mu}{\rho} \right) \cdot \rho \cdot x \right] \right\} = I_0 \cdot [\exp(-\mu \cdot x)] \quad (1)$$

sedangkan intensitas yang terserap bahan I_a adalah :

$$I_a = I_0 \cdot \left\{ 1 - e \left[- \left(\frac{\mu}{\rho} \right) \cdot \rho \cdot x \right] \right\} = I_0 \cdot [1 - e (-\mu \cdot x)] \quad (2)$$

Intensitas gamma yang terserap tersebut akan membangkitkan panas dalam bahan sebesar:

$$\phi = k \cdot I_a \cdot E_\gamma \quad (3)$$

dengan :

(μ/ρ) = koefisien serapan massa dari bahan atau medium, dalam cm^2/g , dan

ρ = massa jenis atau kadang disebut rapat massa bahan, dalam g/cm^3 .

k = muatan keunsuran = $1.6021892 \times 10^{-13}$ J/MeV.

E_γ = Energi foton gamma, MeV.

Aplikasi lebih jauh untuk memperhitungkan spektrum gamma energi (i) dan jenis bahan yang dilewati (j) menjadikan persamaan di atas harus disempurnakan menjadi:

$$\phi = k \cdot \sum_i I_{a,i} \cdot E_{\gamma,i} \quad (4)$$

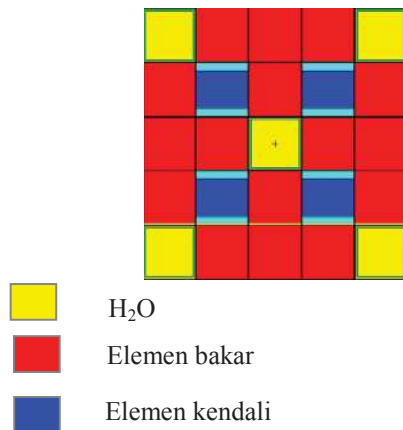
$$I_{a,i} = I_{o,i} \cdot \left\{ 1 - \sum_j e \left[- \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_{i,j} \cdot \rho_j \cdot x_j \right] \right\} = I_{o,i} \cdot \left[1 - \sum_j e (-\mu_i \cdot x_j) \right] \quad (5)$$

Program Gamset termodifikasi telah dilengkapi dengan pemodelan tabung Al-Aloy yang memisahkan teras dengan reflektor. Implementasi persamaan atenuasi di atas dapat diterapkan untuk teras, tabung pembatas dan reflektor yang memiliki berbagai jenis bahan yang berbeda.

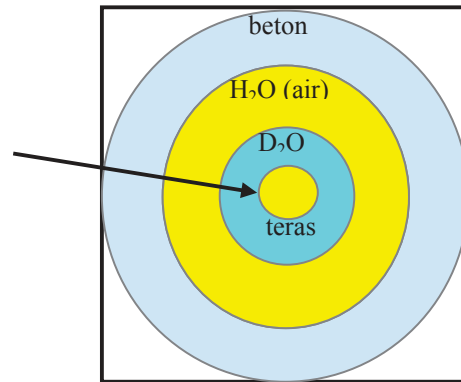
METODE PERHITUNGAN

Teras reaktor RRI didesain untuk kestabilan operasi dan efektifitas penggunaan reaktor. Langkah yang diambil diantaranya pemisahan teras aktif dengan fasilitas iradiasi, sehingga kegiatan apapun di fasilitas iradiasi tidak akan mengganggu kondisi operasi reaktor. Reflektor yang merupakan posisi semua fasilitas iradiasi digunakan D_2O , sedangkan H_2O digunakan sebagai moderator dan pendingin teras. Perbedaan jenis pendingin dan reflektor inilah yang mengharuskan penggunaan tabung pemisah Al-Aloy.

Peningkatan unjuk kerja reaktor juga ditempuh dengan penggunaan bahan bakar jenis baru seperti Uranium Molybdenum (UMo) dengan tingkat muat tinggi dan dioperasikan pada daya tinggi (50 WM). Teras reaktor tersusun dalam matrik bahan bakar 5x5 (Gambar 1), dibatasi dengan tabung Al-Aloy berdiameter 60 cm, dan dikelilingi dengan reflektor D_2O setebal 86 cm sehingga diameter luarnya 117,5 cm (Gambar 2)[6,7,8]. Di luar reflektor D_2O , teras masih diselimuti dengan H_2O sebagai pendingin, sampai diameter luarnya 600 cm, diakhiri dengan beton setebal 250 cm. Berdasarkan geometri tersebut di atas, teras reaktor dimodelkan seperti Gambar 1 dan Gambar 2.



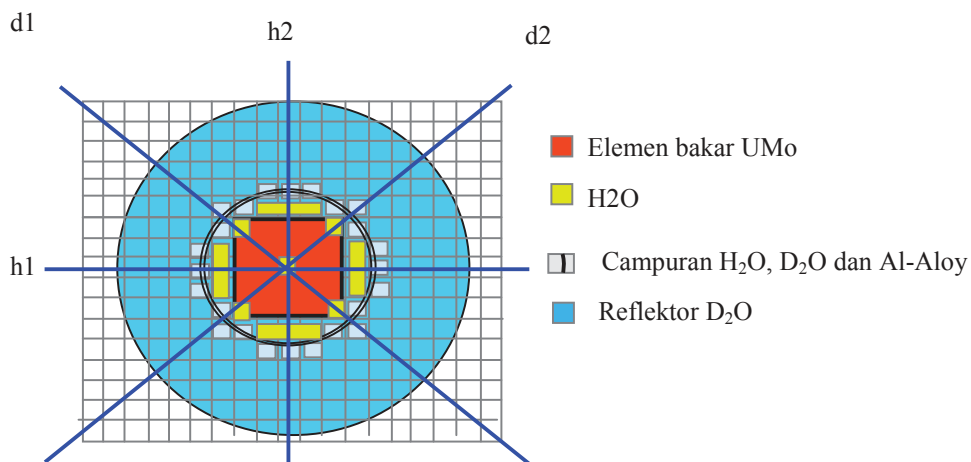
Gambar 1. Matrik teras RRI (5x5)



Gambar 2. Potongan melintang teras RRI

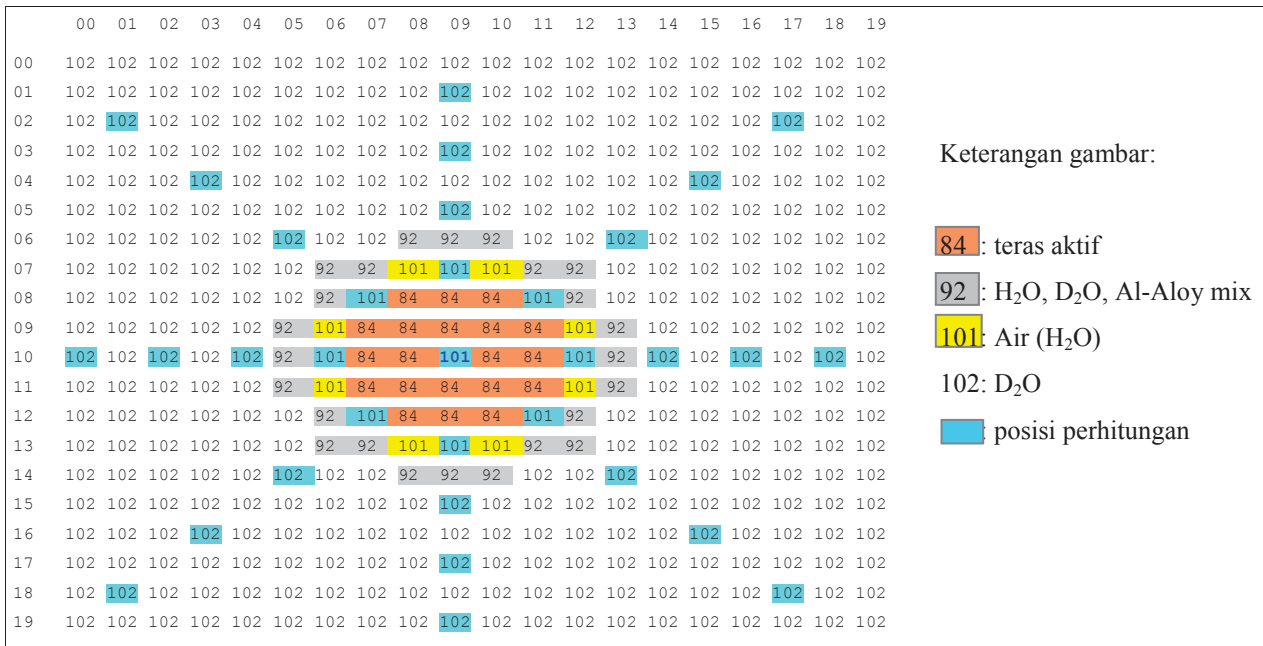
Seperti dikemukakan di atas, penentuan panas gamma dilakukan dengan menggunakan program komputer (*tool*) Gamset, diterapkan untuk posisi di teras maupun di reflektor[1,9]. Untuk mendapatkan nilai dan distribusi panas gamma di seluruh teras dan reflektor, diperlukan pengambilan titik-titik representatif dari daerah teras reaktor maupun di reflektor D₂O sehingga diperoleh agihan atau pola distribusi di seluruh teras dan reflektor.

Gambar 3 merupakan model konfigurasi teras reaktor RRI dalam bentuk matrik 20x20, dan titik-titik perhitungan akan dilakukan sepanjang garis horisontal 1 (h1), garis horisontal 2 (h2), garis diagonal 1 (d1) dan garis diagonal 2 (d2). Diharapkan titik-titik perhitungan ini dapat memberikan gambaran yang cukup tentang distribusi panas gamma di seluruh teras dan reflektor reaktor RRI.



Gambar 3. Model konfigurasi teras RRI

Dari bentuk konfigurasi teras pada Gambar 3, titik-titik perhitungan ditetapkan/dipilih masing-masing 9 (sembilan) titik untuk setiap potongan, sehingga diperoleh 33 titik perhitungan yang terbagi di dalam teras (9 titik) dan di reflektor (24 titik). Posisi setiap titik perhitungan selengkapnya diberikan dalam Gambar 4 berikut:



Gambar 4. Model konfigurasi teras RRI dan posisi perhitungan.

Hasil perhitungan akan diinterpolasi dan ekstrapolasi untuk mendapatkan distribusi panas gamma di seluruh teras RRI. Karena terjadi perubahan tingkat muat uraniumnya, maka perhitungan juga dilakukan untuk tingkat muat U-235 dari 300 g, 390 g, 450 g, 550 g dan 700 g [6,8,10,11]. Distribusi pembangkitan daya rerata per tingkat muat elemen bakar diberikan dalam Tabel 1. Karena perubahan distribusi daya tidak begitu signifikan, maka disajikan untuk 3 (tiga) jenis teras saja. Data karakteristik bahan utama yang digunakan dalam perhitungan diberikan dalam Tabel 2.

Tabel 1. Distribusi daya teras RRI untuk teras dengan tingkat muat U-235: 300, 450 dan 700 g[10].

Tingkat muat: 300 g					Tingkat muat: 450 g					Tingkat muat: 700 g				
	2.4	2.1	2.4			2.4	2.1	2.4			2.6	2.2	2.3	
2.3	2.7	3.0	2.8	2.3	2.3	2.6	3.1	2.8	2.2	2.3	2.6	2.7	3.0	2.3
2.3	2.9	0	2.7	2.2	2.3	2.9	0	2.6	2.2	2.3	2.7	0	2.7	2.3
2.3	2.8	3.0	2.7	2.3	2.3	2.9	3.1	2.6	2.3	2.5	2.8	2.7	2.5	2.5
	2.4	2.1	2.4			2.4	2.1	2.4			2.3	2.2	2.6	

Tabel 2. Data karakteristik bahan utama[2,9].

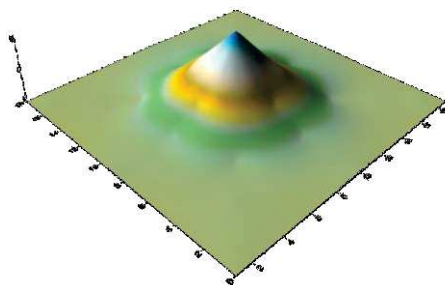
Jenis data	Campuran kelongsong dan elemen bakar dengan tingkat muat U-235:					H ₂ O	D ₂ O	Al	Campuran D ₂ O-H ₂ O-Al Alloy
	300 g	390 g	450 g	550 g	700 g				
σ (barn)	10,25	12,36	15,57	19,17	24,66	0,2418	0,0005	0,2650	0,25
ρ (gr/cc)	3,76	3,99	4,34	4,73	5,32	1	1,105	2,70	1,83
A (gr/mol)	40,16	43,05	47,39	52,22	59,49	18	20,03	26,982	19,88
(μ/ρ) 1, (cm ⁻¹)	0,4867	0,5497	0,6331	0,7131	0,8135	0,0428	0,0223	0,0362	0,04
(μ/ρ) 2, (cm ⁻¹)	0,0465	0,0489	0,0522	0,0553	0,0591	0,0331	0,0298	0,0290	0,03
(μ/ρ) 3, (cm ⁻¹)	0,0262	0,0264	0,0268	0,0271	0,0275	0,0282	0,0254	0,0243	0,025

HASIL DAN PEMBAHASAN

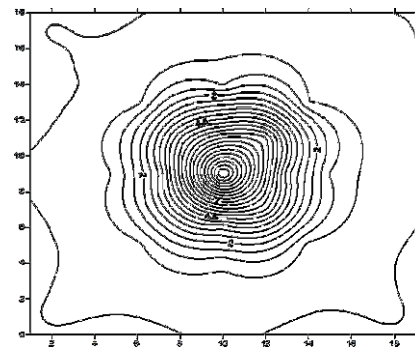
Hasil perhitungan panas gamma teras RRI disajikan dalam Tabel 3, Gambar 5, 6 dan 7 untuk teras 300 g. Hasil perhitungan untuk teras 300 g, dibandingkan dengan data panas gamma tertinggi di reaktor RSG-GAS, teras RRI memiliki panas gamma yang jauh lebih tinggi seperti ditunjukkan pada Tabel 3, sehingga kurang menguntungkan untuk penempatan fasilitas iradiasi di teras (diperlukan biaya lebih untuk keselamatan fasilitas). Hal ini wajar karena perbedaan daya 50 MW dibanding 30 MW untuk RSG dan konfigurasi teras RRI yang kompak dengan 20 elemen bakar dibanding 48 untuk RSG, sehingga konsentrasi pembangkitan daya terkumpul pada volume teras yang kecil, mengakibatkan sumber dan kerapatan gamma juga meningkat di daerah teras.

Tabel 3. Distribusi panas gamma teras RRI dengan tingkat muat U-235: 300 g

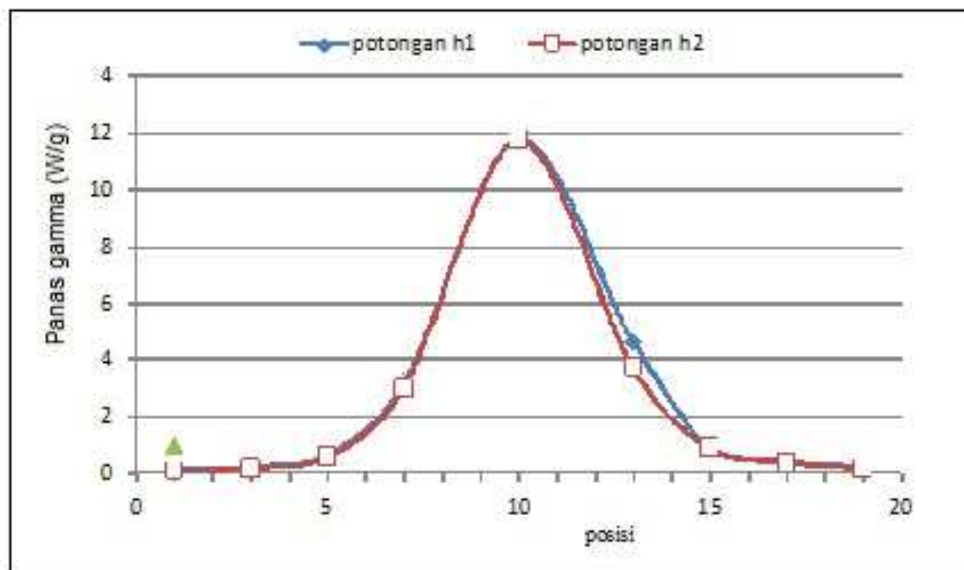
Irisan h1		Irisan h2		Irisan d1		Irisan d2	
Posisi	Panas gamma (W/g)	Posisi	Panas gamma (W/g)	Posisi	Panas gamma (W/g)	Posisi	Panas gamma (W/g)
(10 , 00)	0,08	(01 , 09)	0,07	(02 , 01)	0,03	(18 , 01)	0,03
(10 , 02)	0,22	(03 , 09)	0,18	(04 , 03)	0,09	(16 , 03)	0,09
(10 , 04)	0,65	(05 , 09)	0,58	(06 , 05)	0,34	(14 , 05)	0,33
(10 , 06)	3,13	(07 , 09)	2,99	(08 , 07)	3,93	(12 , 07)	5,05
(10 , 09)	11,75	(10 , 09)	11,75	(10 , 09)	11,75	(10 , 09)	11,75
(10 , 12)	4,62	(13 , 09)	3,69	(12 , 11)	6,59	(08 , 11)	5,00
(10 , 14)	0,94	(15 , 09)	0,94	(14 , 13)	0,51	(06 , 13)	0,34
(10 , 16)	0,42	(17 , 09)	0,39	(16 , 15)	0,21	(04 , 15)	0,05
(10 , 18)	0,23	(19 , 09)	0,16	(18 , 17)	0,07	(02 , 17)	0,03



Gambar 5. Distribusi panas gamma teras RRI



Gambar 6. Kontur panas gamma teras RRI



Gambar 7. Distribusi panas gamma potongan h1 dan h2

Desain teras RRI menempatkan semua fasilitas iradiasi di luar teras, atau di reflektor D₂O. Hal ini menguntungkan karena panas gamma di reflektor sangat rendah, akibat dari posisi yang di luar teras aktif, dan adanya tabung Al-Aloy sangat signifikan mengurangi panas gamma di reflektor. Panas gamma yang rendah akan mengurangi biaya pembuatan fasilitas keselamatannya. Karena distribusi daya (PPF) yang hampir mirip untuk semua jenis tingkat muat elemen bakar, mengakibatkan distribusi gammanya juga mirip satu dengan yang lain. Satu-satunya perbedaan hanyalah bahwa terdapat penurunan panas gamma sebagai fungsi kenaikan tingkat muat uraniumnya.

Perhitungan panas gamma telah dilakukan untuk semua tingkat muat bahan bakarnya, tetapi karena kemiripan pola distribusi gamma yang diperoleh, maka pola distribusi elemen bakar 300 g dianggap cukup mewakili untuk elemen bakar dengan tingkat muat yang lain. Selanjutnya cukup nilai maksimum saja yang diperlukan untuk dibahas lebih lanjut. Tabel 4 dan Gambar 8 menunjukkan variasi panas gamma sebagai fungsi tingkat muat untuk posisi di tengah teras.

Tabel 4. Perubahan panas gamma pada posisi pusat teras (10,09)

	Panas gamma (W/g) teras RRI sebagai fungsi tingkat muat bahan bakar				
RSG-GAS	300 g	390 g	450 g	550 g	700 g
5.36	11,75	11,07	10,21	9,40	7,83

Dari hasil perhitungan untuk berbagai tingkat muat U-235, maka nampak adanya penurunan panas gamma sebagai fungsi kenaikan tingkat muat uraniumnya. Panas gamma turun dari 11,75 W/g pada teras 300 gU/cc menjadi hanya 7,83 W/g untuk tingkat muat U-235 700 gU/cc. Dengan kata lain, semakin tinggi tingkat muatnya, semakin rendah panas gammanya. Hal ini sangat menguntungkan, karena panas gamma yang rendah akan lebih selamat dan hemat biaya fasilitas, sedangkan tingkat muatan uranium yang tinggi akan memperpanjang umur operasi di setiap siklusnya. Dengan demikian, penggunaan elemen bakar dengan tingkat muat yang tinggi akan menguntungkan dari berbagai aspek keselamatan dan ekonomi.

KESIMPULAN

Dari hasil perhitungan dan uraian di atas, yang ternyata diperoleh bahwa panas gamma teras RRI sangat tinggi, tetapi cukup rendah di reflektor, maka dapat disimpulkan bahwa dari segi pembangkitan panas gamma, desain teras RRI sangat aman untuk iradiasi apapun di reflektor, jauh lebih aman dibanding RSG-GAS, tetapi perlu perhatian khusus jika akan dilakukan iradiasi di teras reaktor (panas gamma teras RRI 11,75 W/g dibanding hanya 5,36 W/g di teras RSG). Penggunaan elemen bakar dengan tingkat muat yang tinggi nampak lebih menguntungkan, karena selain waktu operasinya lebih panjang, juga panas gammanya lebih rendah sehingga lebih aman,

UCAPAN TERIMAKASIH.

Ucapan terimakasih kami sampaikan kepada Dra. Lilly Suparlina, Drs. Amir Hamzah,MSi, Ir. Pudjijanto MS dan Anis Rohanda ST atas diskusi dan dukungan data serta bantuan teknis yang diberikan selama penelitian berlangsung.

DAFTAR PUSTAKA

1. Setiyanto. dkk. Aplikasi program perhitungan panas gamma 'Gamset' pada RSG-GAS. Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah, PPNY-BATAN; 1992.
2. Pudjijanto MS. dan Setiyanto. Modifikasi dan validasi 'program Gamset' untuk analisis distribusi panas gamma teras Reaktor Riset Inovatif (RRI). Laporan teknis hasil penelitian PTKRN; 2014.
3. Lemaire.M, Vaglio-Gaudard. C, Reynard-Carette. C. For a better estimation of gamma heating in experimental reactors and devices: Stakes and work plan from calculation methods to nuclear data. Proceedings of 2013 3rd International Conference on Advancements in Nuclear Instrumentation Measurement Methods and their Applications (ANIMMA), Aix Marseille; 2013.
4. D. Blanchet, N. Huot, P. Sireta, H. Serviere, M. Boyard. at all. Qualification of a gamma-ray heating calculation scheme for the future Jules Horowitz material testing reactor (RJH). Science Direct. Annals of Nuclear Energy. 2008; 35:731-745
5. M. Varvayanni, N. Catsaros, M. Antonopoulos-Domis. Evaluation of nuclear heating of small samples in a research reactor core. Science Direct. Annals of Nuclear Energy. 2008; 35:p. 1414-1420.
6. Tukiran S, dkk. Desain konseptual teras Reaktor Riset Inovatif berbahan bakar uranium molibdenum dari aspek neutronik". Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir Tri Dasa Mega. 2012; 14 (3): 178-191
7. Amir Hamzah. Desain awal perisai radiasi dan analisis laju dosis di daerah kerja Reaktor Riset Inovatif menggunakan MCNPX. Prosiding Seminar Nasional ke-19 Teknologi dan Keselamatan PLTN serta Fasilitas Nuklir. Yogyakarta; 2013.
8. Iman Kuntoro, Tagor Malem Sembiring. Desain teras alternatif untuk reaktor riset inovatif (RRI) dari aspek neutronik. Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir Tri Dasa Mega. 2014;16 (1): 1 - 10
9. Setiyanto. Puissance deposee par les rayonnemants gamma dans le recteur Siloe. Measure par le calorimetrie et calcul par le code Gamset. Application aux experiments complexes. Thesis doctor at INPG-France ; 1991.
10. Lilly SUPARLINA, dkk. Analisis pola manajemen bahan bakar teras reaktor riset tipe MTR. Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir Tri Dasa Mega. 2014; 16(2): 89 - 99.

11. Rokhmadi, Tukiran S. Efek densitas bahan bakar terhadap parameter koefisien reaktifitas teras RRI. *Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir Tri Dasa Mega*. 2013; 15(2): 77 – 89.