

DESAIN TERAS ALTERNATIF UNTUK REAKTOR RISET INOVATIF (RRI) DARI ASPEK NEUTRONIK

Iman Kuntoro, Tagor Malem Sembiring
Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir, BATAN
Kawasan Puspiptek Gedung No. 80, Serpong, Tangerang Selatan
E-mail: imank@batan.go.id

Diterima editor 11 November 2013
Disetujui untuk publikasi 10 Januari 2014

ABSTRAK

DESAIN TERAS ALTERNATIF UNTUK REAKTOR RISET INOVATIF (RRI) DARI ASPEK NEUTRONIK. Berdasarkan dokumen kriteria pengguna dan fungsi utamanya, Reaktor Riset Inovatif (RRI) dipersyaratkan dapat menghasilkan fluks neutron termal maksimum 1×10^{15} neutron $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Hal ini diperlukan agar reaktor RRI dapat digunakan untuk target yang membutuhkan fluks neutron tinggi. Dalam penelitian sebelumnya diperoleh bahwa desain reaktor RRI tidak mungkin menghasilkan fluks neutron tersebut jika menggunakan bahan bakar seperti yang digunakan reaktor RSG-GAS. Hal ini diduga karena dimensinya terlalu besar, mengingat fluks neutron berbanding terbalik dengan volume teras. Tujuan penelitian ini adalah untuk mendapatkan desain teras alternatif reaktor RRI yang memenuhi persyaratan fluks neutron termal tersebut. Alternatif bahan bakar yang dipilih adalah yang dipakai di reaktor JMTR (*Japan Material Testing Reactor*) yang berdimensi lebih kecil dibanding reaktor RSG-GAS. Disamping itu tinggi aktif teras divariasikan 70 cm dan 75 cm. Desain teras dilakukan dengan perangkat analitik WIMS-D5B, Batan-FUEL dan Batan-3DIFF. Teras alternatif menggunakan konsep konfigurasi teras kompak 5×5 dengan 4 elemen kendali jenis *follower*. Berdasarkan hasil perhitungan ada 3 (tiga) teras alternatif yang dapat memenuhi persyaratan tersebut, termasuk teras menggunakan bahan bakar reaktor RSG-GAS dengan menambah tinggi aktifnya menjadi 70 cm dari 60 cm. Dengan menganalisis seluruh aspek, keselamatan serta efisiensi dan efektivitas reaktor, maka teras alternatif dengan bahan bakar tipe JMTR dengan tinggi aktif 70 cm merupakan teras alternatif yang terbaik.

Kata kunci: neutronik, teras kompak, reaktor riset inovatif, fluks neutron termal tinggi

ABSTRACTS

ALTERNATIVE CORE DESIGN FOR THE INNOVATIVE RESEARCH REACTOR (RRI) FROM NEUTRONICS ASPECTS. Based on its User Requirement Document and main function, RRI shall be able to provide a maximum thermal neutron flux of 1×10^{15} neutron $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. The reason is that the RRI reactor can serve targets requiring a high neutron flux. From the previous results it was obtained that RRI design using fuel of RSG-GAS type was not possible to produce that high neutron flux. One among other reasons is that the geometry dimension is the large, as the neutron flux is inversely proportional to core volume. The objective of the study is to find an alternative core for RRI which meets the high neutron flux requirement. It was chosen an alternative fuel element one like used in JMTR (*Japan Material Testing Reactor*) that has smaller dimension compared to that of the RSG-GAS reactor. Besides that, active core's height was also varied for 70 cm and 75 cm. Design was carried out by means of analytic codes WIMS-D5B, Batan-FUEL and Batan-3DIFF. Alternative core applied compact core configuration concept of 5×5 with 4 follower control elements. The calculations resulted 3 (three) alternative cores fulfill the requirement, including core using RSG-GAS fuel type but of 70 cm height instead of 60 cm. Through analyzing from over all aspects of core safety and efficiency as well as effectively, core using JMTR fuel type with height of 70 cm represent the best alternative core.

Key words: neutronics, compact core, innovative research reactor, high thermal neutron flux.

PENDAHULUAN

Indonesia memiliki tiga reaktor riset yaitu reaktor Kartini, reaktor Triga 2000 dan reaktor RSG-GAS yang masing-masing memiliki daya termal sebesar 100 kW, 2 MW dan 30 MW. Diantara ketiga reaktor tersebut, reaktor RSG-GAS yang memiliki fluks neutron termal tertinggi yaitu 2×10^{14} neutron $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Dilihat dari usia operasi reaktor, maka reaktor RSG-GAS memiliki usia termuda yaitu 27 tahun sejak dioperasikan 1987. Mengingat faktor usia ini, diperlukan suatu desain reaktor riset baru sebagai alternatif pengganti jika suatu saat reaktor RSG-GAS dikomisioning.

Tuntutan utama desain reaktor riset saat ini adalah memiliki fluks neutron yang tinggi untuk menyediakan utilisasi reaktor yang optimal. Bahkan parameter yang menjadi ukuran efektifitas suatu reaktor adalah rasio fluks neutron termal maksimum terhadap daya reaktor (FNTMD) yang harus tinggi [1]. Usaha untuk menaikkan tingkat fluks neutron termal juga dilakukan agar meningkatkan rasio ini, seperti yang dilakukan Seo dan Cho [2]. Aspek lain adalah reaktor riset harus memiliki efisiensi yang optimum. Efisiensi reaktor riset akan dipenuhi jika reaktor riset memenuhi fungsi reaktor multi-guna (*multi-purpose research reactor*), dengan demikian reaktor harus dipasang berbagai fasilitas untuk dimanfaatkan dalam banyak fungsi seperti produksi radioisotop, *neutron transmutation doping*, fasilitas *fast neutron*, fasilitas *cold neutron source* dan lainnya [3]. Oleh karena itu, dalam dokumen kriteria pengguna UCD (*User Criteria Document*) Reaktor Riset Inovatif (RRI), nama reaktor yang didesain untuk alternatif reaktor riset di Indonesia, pertimbangan reaktor yang efektif dan efisien itu telah ditetapkan [4].

Karakteristika utama desain konseptual reaktor RRI adalah menggunakan bahan bakar baru UMo dengan densitas uranium yang tinggi, konfigurasi teras yang kompak dengan orde fluks neutron termal yang tinggi, 1×10^{15} neutron $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ [4,5]. Sampai saat ini, desain reaktor RRI yang diusulkan belum dapat memenuhi persyaratan fluks neutron tersebut. Seperti yang dilakukan oleh Tukiran dkk., fluks neutron termal maksimum adalah $4,2 \times 10^{14}$ neutron $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ dari 4 konfigurasi teras yang diusulkan [5]. Akan tetapi yang diunggulkan dalam desainnya adalah FNTMD ($2,1 \times 10^{13}$ MW^{-1}) yang tinggi dan panjang siklus yang sangat tinggi. Nilai FNTMDnya melebihi yang dimiliki reaktor OPAL dengan daya yang sama [1].

Kajian awal menunjukkan penggunaan elemen bakar RSG-GAS dengan tinggi aktif 60 cm tidak mungkin mendapatkan teras setimbang yang memenuhi nilai kriteria desain fluks neutron termal maksimum sebesar 1×10^{15} neutron $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ [6]. Walaupun kriteria tersebut dipenuhi, akan tetapi panjang siklusnya sangat pendek sehingga tidak ekonomis. Oleh karena itu tinggi teras aktif teras perlu dinaikkan agar kerapatan uranium dapat ditingkatkan untuk memperpanjang siklus operasi.

Fakta di dalam pengoperasian reaktor jenis MTR (*material testing reactor*) dengan bahan bakar pelat, bahwa dimensi elemen bakar standar yang lebih kecil dari reaktor RSG-GAS digunakan di beberapa reaktor seperti di reaktor JMTR (*Japan Material Testing Reactor*) dan JRR-3 (*Japan Research Reactor* No. 3) [7]. Fluks neutron termal maksimum di reaktor JMTR dan reaktor RSG-GAS masing-masing sebesar 4×10^{14} neutron/ cm^2/s (50 MW) dan 2×10^{14} neutron/ cm^2/s (30 MW). Hal ini menunjukkan nilai FNTMD reaktor JMTR lebih tinggi dibanding di reaktor RSG-GAS. Oleh karena itu, elemen bakar yang berukuran lebih kecil ini tentunya jika diaplikasikan di reaktor RRI akan dapat meningkatkan fluks neutron di teras sesuai dengan hubungan antara fluks neutron dan volume reaktor. Disamping itu, elemen bakar JMTR dipilih karena dengan dimensi yang relatif kecil mampu dioperasikan dengan baik dengan kerapatan uranium yang lebih tinggi, $4,8 \text{ g cm}^{-3}$.

Seperti disinggung di atas, desain teras setimbang reaktor RRI harus memiliki panjang siklus yang cukup agar efisien. Salah satu cara dengan penambahan tinggi aktif teras agar massa uranium dapat ditingkatkan untuk peningkatan panjang siklus. Reaktor JMTR memiliki tinggi aktif sebesar 75 cm sedang reaktor RSG-GAS sebesar 60 cm [7,8]. Akan tetapi perlu dilakukan optimasi tinggi aktif teras, mengingat jika volume teras semakin besar karena meningkatnya tinggi aktif teras akan berakibat menurunkan fluks neutron. Dengan demikian efek tinggi teras juga perlu dianalisis dalam

desain reaktor. Oleh karena itu, tujuan dari penelitian ini adalah mendapatkan desain teras setimbang alternatif reaktor RRI dengan mengaplikasikan dimensi luas penampang elemen bakar yang lebih kecil dengan mengoptimalkan tinggi aktif teras untuk mendapatkan fluks neutron termal maksimum sebesar 1×10^{15} neutron $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Dalam penelitian ini, parameter yang dianalisis adalah dari aspek neutronik yang berkaitan dengan aspek keselamatan secara statis. Sedangkan aspek termohidraulika, mekanik dan keselamatan transien tidak menjadi fokus penelitian ini.

Parameter elemen bakar yang diubah dalam penelitian ini adalah mengecilkan lebar kanal pendingin di antara 2 (dua) pelat dan meningkatkan tinggi aktif teras, yang masing-masing mempengaruhi dimensi elemen bakar ke arah radial dan aksial. Penggunaan densitas uranium yang tinggi tidak akan aman jika ketebalan *meat* diperkecil. Akan tetapi, panjang *meat* diperkecil sesuai dengan acuan yang dipakai di reaktor JMTR. Oleh karena itu dalam penelitian ini ketebalan *meat* diasumsikan tetap. Analisis dilakukan dengan perangkat analitik untuk perhitungan sel bahan bakar dan perhitungan teras. Perhitungan sel bahan bakar menggunakan metode *transpor* neutron WIMSD-5B [9] untuk mendapatkan konstanta kelompok difusi neutron perangkat bahan bakar. Paket program BATAN-FUEL dan BATAN-3DIFF digunakan untuk perhitungan teras dengan metode difusi neutron masing-masing untuk 2- dan 3-dimensi [10,11].

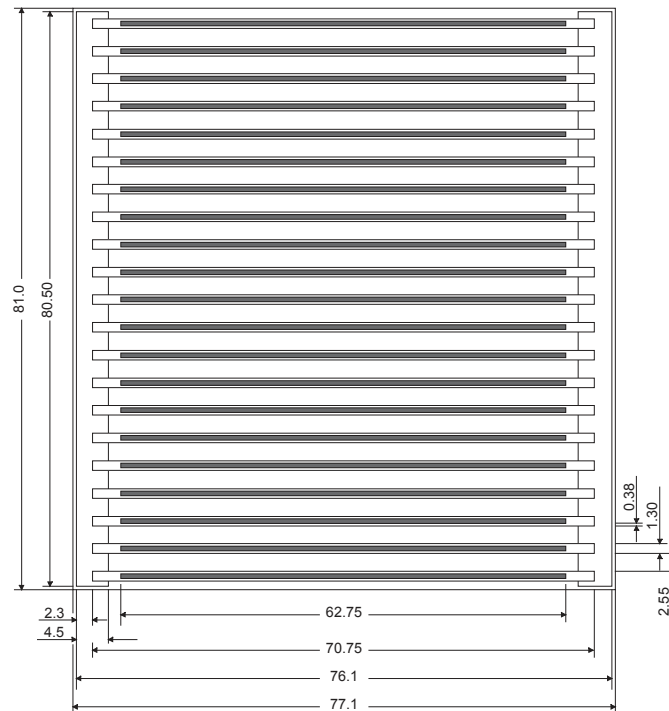
DESKRIPSI BAHAN BAKAR

Reaktor RSG-GAS adalah reaktor jenis kolam terbuka dengan pendingin dan moderator H₂O dan reflektor berilium (Be). Untuk mencapai daya nominal 30 MW (termal), reaktor RSG-GAS disusun dalam konfigurasi teras dengan jumlah elemen bakar standar (FE) sebanyak 40 buah dan elemen bakar kendali (CE) sebanyak 8 buah. Tampang lintang elemen bakar standar reaktor RSG-GAS dapat dilihat seperti pada Gambar 1. Satu elemen bakar reaktor RSG-GAS berdimensi 8,05 cm × 7,61 cm dengan jumlah pelat bahan bakar sebanyak 21 buah [10].

Elemen bakar standar reaktor JMTR memiliki dimensi yang relatif lebih kecil dibanding dengan elemen bakar standar yang dipakai di reaktor RSG-GAS, yaitu 7,62 cm × 7,62 cm. Dari aspek luas tampang lintang FE, elemen bakar yang digunakan di reaktor JMTR lebih kecil 5,2% luasnya dibanding reaktor RSG-GAS. Akan tetapi kalau dilihat dari luas *meat* dalam sebuah FE, yang digunakan di reaktor JMTR lebih kecil 19% lebih kecil dibanding yang di reaktor RSG-GAS. Ukuran yang lebih kecil ini diakibatkan:

- jumlah pelat bahan bakar yang lebih sedikit
- dimensi *meat* yang lebih kecil, khususnya panjang *meat*.

Dipandang dari aspek volume *meat* dalam sebuah FE, yang digunakan di reaktor JMTR lebih besar 4,6% dibanding yang digunakan di reaktor RSG-GAS. Tabel 1 menunjukkan perbandingan elemen bakar standar reaktor RSG-GAS dan JMTR.



Gambar 1. Elemen bakar standar reaktor RSG-GAS (satuan: mm) [8]

Tabel 1. Elemen bakar standar reaktor RSG-GAS dan JMTR

Parameter	Jenis reaktor	
	RSG-GAS	JMTR
Tebal <i>meat</i> , cm	0,054	0,051
Panjang <i>meat</i> , cm	6,275	6,16
Tinggi <i>meat</i> , cm	60	75
Tebal kelongsong, cm	0,038	0,038
Jumlah pelat	21	19
Lebar celah pendingin (jumlah celah × lebar tiap celah, cm)	20 × 0,255	12 × 0,267; 2 × 0,292 dan 4 × 0,302
Dimensi FE, cm × cm	8,05 × 7,61	7,62 × 7,62
Dimensi kisi, cm × cm	8,1 × 7,71	7,72 × 7,72

METODOLOGI

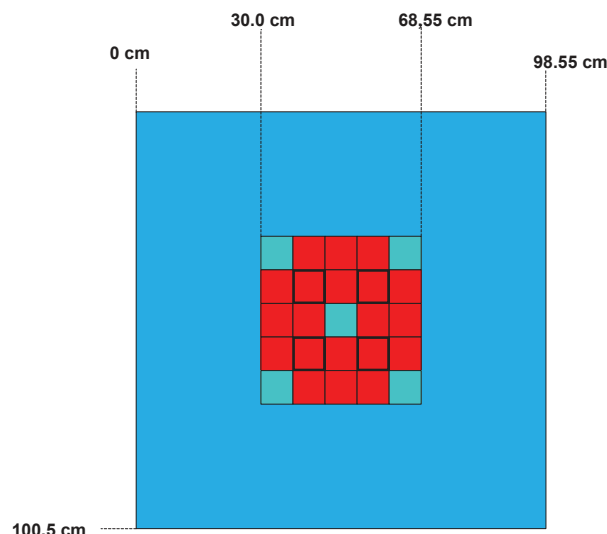
Sebelum menentukan langkah-langkah perhitungan dalam penelitian ini, perlu ditentukan parameter FE yang digunakan sebagai alternatif untuk desain reaktor RRI. Seperti disinggung di dalam Pendahuluan, diasumsikan tebal *meat* dan kelongsong tetap. Kemudian ukuran FE dikurangi menjadi 7,62 cm × 7,62 cm sehingga lebih kecil dibanding dimensi FE RSG-GAS. Untuk mengetahui efek tinggi aktif bahan bakar, teras alternatif dibandingkan untuk tinggi 70 cm dan 75 cm. Tabel 2 menunjukkan perbandingan dimensi elemen bakar standar untuk Alternatif-1, Alternatif-2 dan Alternatif-3.

Tabel 2. Parameter FE untuk teras Alternatif-1, Alternatif-2 dan Alternatif-3

Parameter	FE		
	Alternatif-1	Alternatif-2	Alternatif-3
Tebal <i>meat</i> , cm	0,054	0,054	0,054
Panjang <i>meat</i> , cm	6,275	6,16	6,16
Tinggi <i>meat</i> , cm	70	70	75
Tebal kelongsong, cm	0,038	0,038	0,038
Volume <i>meat</i> per pelat, cm ³	16,692	16,386	17,556
Jumlah pelat	21	21	21
Lebar celah pendingin (jumlah celah × lebar setiap celah,cm)	20 × 0,255	20 × 0,233	20 × 0,233
Dimensi FA, cm × cm	8,05 × 7,61	7,62 × 7,62	7,62 × 7,62
Dimensi kisi, cm × cm	8,1 × 7,71	7,72 × 7,72	7,72 × 7,72

Konfigurasi teras yang dipakai dalam menganalisis efek dimensi FE disajikan dalam Gambar 2. Teras tersusun dalam kisi 5×5, dioperasikan dengan daya 50 MW termal yang memiliki spesifikasi berikut ini:

- 16 elemen bakar standar (FE)
- 4 elemen bakar kendali (CE)
- reflektor dengan tebal 30 cm
- 5 posisi iradiasi dalam teras, masing-masing 4 posisi di tiap sudut dan 1 posisi di tengah
- elemen kendali berbentuk *follower*
- elemen bakar tidak memakai *Cd wire*.



Gambar 2. Konfigurasi teras reaktor RRI

Perlu dicatat bahwa ukuran pada Gambar 2, 98,55 cm × 100,5 cm, memakai acuan bahan bakar yang memakai tipe Alternatif-1. Untuk Alternatif-2 dan -3, maka ukuran teras menjadi 98,6 cm × 98,6 cm.

Dalam penelitian ini digunakan beberapa kriteria desain yang harus dipenuhi yaitu:

1. Batas margin untuk kondisi *one stuck rod* adalah minimum sebesar 0,5 % $\Delta k/k$. Perlu dicatat elemen bakar tidak menggunakan *Cd-wire* untuk meningkatkan margin padam di awal siklus.
2. Fluks neutron termal maksimum di posisi iradiasi dalam teras harus memenuhi kriteria desain sebesar 1×10^{15} neutron $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
3. Panjang siklus yang optimal dengan margin kondisi *one stuck rod* maksimal.

Tahap perhitungan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut. Pertama melakukan generasi konstanta kelompok difusi untuk 3 (tiga) alternatif elemen bakar dengan paket program WIMD-D5B. Konstanta kelompok difusi dilakukan untuk 17 tingkat fraksi bakar dalam rentang 0% - 90% (235U), kondisi Xe (tanpa dan setimbang) dan kondisi temperatur pada daya rendah serta daya nominal. Kedua, melakukan penyusunan konstanta kelompok difusi dalam format BATAN-FUEL. Ketiga, melakukan perhitungan teras 3-dimensi dengan model geometri X-Y-Z untuk mendapatkan koreksi buckling ke arah aksial dengan paket program BATAN-3DIFF. Keempat melakukan perhitungan teras setimbang dengan paket program difusi neutron 2-dimensi (model geometri X-Y), dengan BATAN-FUEL. Akhirnya melakukan analisis parameter parameter untuk menentukan teras alternatif terbaik, yaitu:

- Siklus operasi reaktor yang relatif panjang, minimum 20 hari pada daya penuh,
- Kerapatan panas yang relatif kecil agar beban panas di setiap elemen bakar relatif kecil juga, dengan menjaga faktor puncak daya ke arah radial maksimum 1,2,
- Nilai FNTMD, yang menggambarkan sejauh mana efektivitas teras menyediakan fluks neutron per satuan daya reaktor,
- Efisiensi penggunaan bahan bakar, yang digambarkan dalam jumlah massa ^{235}U yang diperlukan dibanding energi yang dihasilkan dalam satu siklus,
- Parameter keselamatan yaitu margin padam dan faktor puncak daya radial maksimum daya reaktor.

HASIL PERHITUNGAN DAN PEMBAHASAN

Sesuai dengan langkah perhitunga yang ditetapkan sebelumnya, pertama kali perlu dilakukan perhitungan penentuan buckling (B_z^2). Hasil perhitungan buckling (B_z^2) untuk tinggi aktif 70 cm dan 75 cm dengan BATAN-3DIFF masing-masing adalah 1.2438×10^{-3} dan 1.1127×10^{-3} . Nilai (B_z^2) ini dipakai dalam penentuan teras setimbang dengan paket program BATAN-FUEL.

Hasil perhitungan BATAN-FUEL di Tabel 3, 4 dan Gambar 3 - 5 menunjukkan bahwa teras Alternatif -1, -2 dan -3, dapat memenuhi persyaratan fluks neutron termal 1×10^{15} neutron $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ masing-masing dengan panjang siklus sebesar 20 hari (1000 MWD), 22 hari (1012 MWD) dan 25 hari (1250 MWD). Hasil ini terutama disebabkan oleh kandungan massa ^{235}U untuk teras Alternatif-3 paling tinggi dibanding dua teras lainnya, yaitu sebesar 460 g dibandingkan dengan 400 g dan 360 g. Perlu dicatat bahwa pemilihan massa ini diperoleh dari hasil optimasi, yaitu dipenuhinya batas keselamatan *one stuck rod*, minimal 0,5 % $\Delta k/k$.

Teras Alternatif-2 memiliki daya reaktor yang lebih rendah 8% dibanding teras Alternatif-1 dan -3 untuk memenuhi memenuhi persyaratan fluks neutron termal 1×10^{15} neutron $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Hal ini menguntungkan dari aspek kerapatan panas yang dibebankan pada setiap perangkat bahan bakar. Teras Alternatif-2 memiliki kerapatan panas sebesar 570 W/cc atau lebih kecil 3,6% dibanding teras Alternatif-1 atau lebih kecil 1,6% dibanding teras Alternatif-3. Jika dibanding dengan kerapatan panas yang dimiliki reaktor CARR (*China Advanced Research Reactor*), nilai ini lebih besar 10 W/cc atau identik dengan 1,79%, akan tetapi reaktor CARR memiliki daya yang lebih tinggi yaitu 60 MW [12]. Hal ini disebabkan volume reaktor CARR lebih besar dibanding teras Alternatif-2.

Dari aspek nilai FNTMD hasil menunjukkan bahwa teras Alternatif-1, -2 dan -3 memberikan nilai sebesar $2,14 \times 10^{13}$ neutron $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{MW}^{-1}$, $2,17 \times 10^{13}$ neutron $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{MW}^{-1}$ dan $2,0 \times 10^{13}$ neutron $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{MW}^{-1}$. Nilai FNTMD dari tiga teras alternatif tersebut lebih tinggi dari yang dimiliki reaktor HANARO (Korea Selatan) dan reaktor OPAL (Australia), yang masing-masing nilai FNTMD sebesar $1,7 \times 10^{13}$ neutron $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{MW}^{-1}$ dan $1,5 \times 10^{13}$ neutron $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{MW}^{-1}$ [1]. Dengan demikian rasio fluks neutron termal perdaya reaktor teras Alternatif-2 menunjukkan efektifitas desain karena

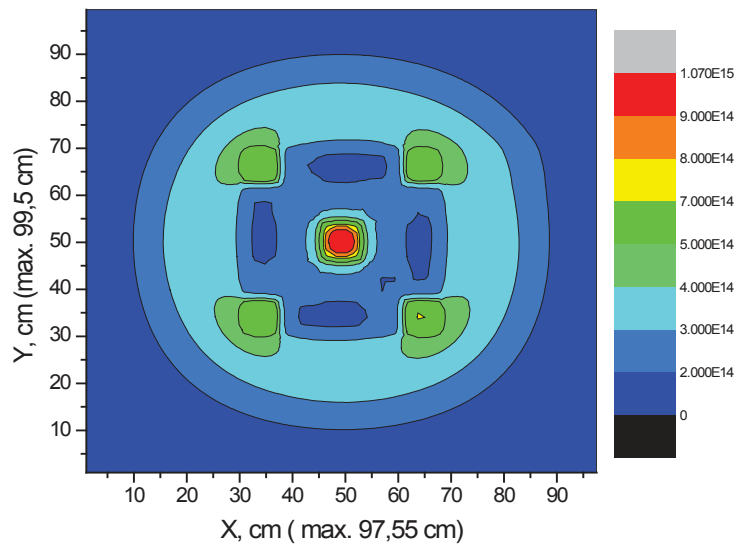
memiliki nilai FNTMD yang relatif tinggi yaitu sebesar 27,6% dibandingkan dengan reaktor HANARO yang merupakan reaktor yang efektif fluks neutronnya.

Tabel 3. Parameter teras setimbang untuk teras Alternatif -1, -2 dan -3

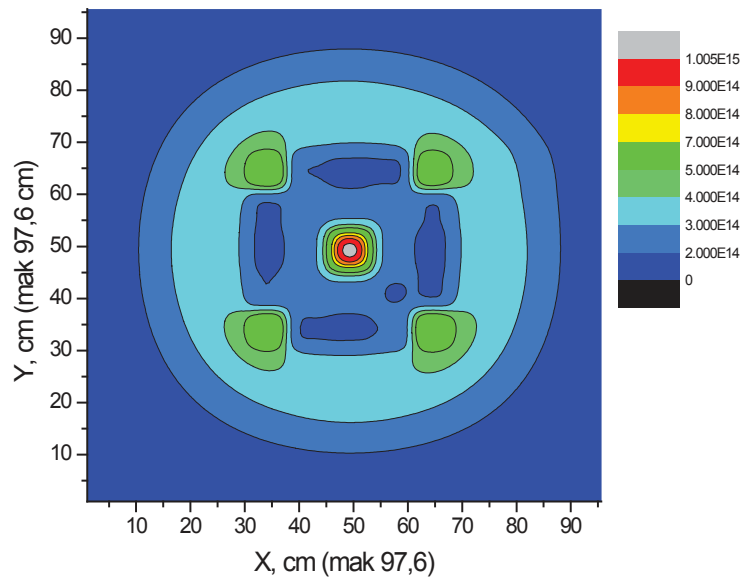
Parameter Teras	Nilai		
	Alternatif -1	Alternatif -2	Alternatif -3
Massa ^{235}U per bahan bakar standar, g	360	400	460
Kerapatan uranium dalam <i>meat</i> , g cm^{-3}	3,66	4,39	4,71
Ukuran kisi teras, $\text{cm} \times \text{cm}$	$8,1 \times 7,71$	$7,72 \times 7,72$	$7,72 \times 7,72$
Tinggi aktif, cm	70	70	75
Daya, MWth / Panjang siklus, hari	50 / 20	46 / 22	50 / 25
Reaktivitas satu siklus, $\% \Delta k/k$	6,17	6,09	6,67
Reaktivitas Xe+Sm, $\% \Delta k/k$	4,01	3,57	3,51
Reaktivitas <i>Cold to hot</i> , $\% \Delta k/k$	0,41	0,29	0,27
Reaktivitas untuk eksperimen dan Xe. <i>override</i> , $\% \Delta k/k$	1,62	1,82	1,83
Reaktivitas lebih, $\% \Delta k/k$	12,20	11,77	12,29
Nilai batang kendali, $\% \Delta k/k$	-24,69	-25,68	-24,83
Reaktivitas padam (<i>stuck rod</i>), $\% \Delta k/k$	-0,60	-1,68	-0,72
Rapat daya rerata (W/cc)	591	570	579
Faktor puncak daya radial maksimum	1,14	1,14	1,15
Fraksi bakar maksimum, %	61,42	60,72	64,71

Tabel 4. Fluks neutron teras Alternatif-1,-2 dan -3

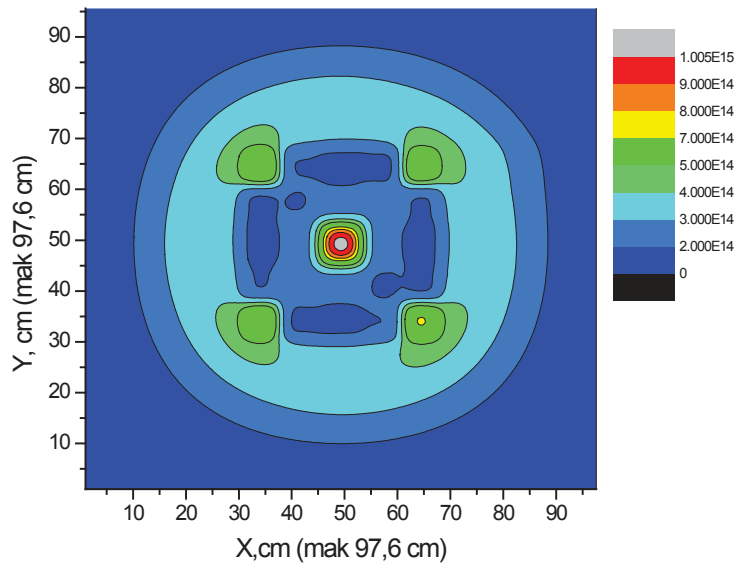
Posisi/Kelompok tenaga neutron	Fluks neutron maksimum, $\times 10^{15}$ neutron $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$		
	Alternatif-1	Alternatif-2	Alternatif-3
Tengah teras			
cepat, $> 0,821$ MeV	0,25	0,24	0,24
epitermal, $0,625 \text{ eV} < E < 0,821$ MeV	0,53	0,51	0,51
termal, $< 0,625$ eV	1,07	1,00	1,00
Tepi teras			
cepat, $> 0,821$ MeV	0,20	0,19	0,19
epitermal, $0,625 \text{ eV} < E < 0,821$ MeV	0,42	0,40	0,41
termal, $< 0,625$ eV	0,71	0,68	0,69
Reflektor luar			
cepat, $> 0,821$ MeV	0,06	0,07	0,07
epitermal, $0,625 \text{ eV} < E < 0,821$ MeV	0,23	0,25	0,25
termal, $< 0,625$ eV	0,49	0,47	0,48



Gambar 3. Kontur fluks neutron termal di teras Alternatif-1 dengan tinggi aktif 70 cm (satuan untuk fluks neutron adalah neutron $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)



Gambar 4. Kontur fluks neutron termal di teras Alternatif-2 dengan tinggi aktif 70 cm (satuan untuk fluks neutron adalah neutron $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)



Gambar 5. Kontur fluks neutron termal di teras Alternatif-3 dengan tinggi aktif 75 cm (satuan untuk fluks neutron adalah neutron $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)

Efisiensi penggunaan bahan bakar ditinjau dari nilai rasio massa ^{235}U bahan bakar segar yang diperlukan pada setiap awal siklus dengan jumlah energi yang dihasilkan selama satu siklus. Dari parameter ini, jika nilainya kecil maka efisiensi penggunaan bahan bakarnya tinggi. Teras Alternatif-1, -2 dan -3 masing-masing memiliki efisiensi penggunaan bahan bakar sebesar 1,70 g/MWD, 1,86 g/MWD dan 2,17 g/MWD. Dibandingkan dengan efisiensi dari reaktor RSG-GAS sebesar 2,24 g/MWD, maka tampak bahwa 3 (tiga) teras alternatif tersebut memiliki efisiensi penggunaan bahan bakar yang lebih relatif tinggi.

Untuk aspek keselamatan teras alternatif dalam Tabel 1 dapat dilihat dari parameter reaktivitas padam (saat satu batang kendali gagal masuk, *one stuck rod*) dan faktor puncak daya (FPD) ke arah radial maksimum. Teras Alternatif-2 memiliki reaktivitas padam yang paling tinggi dibanding teras lainnya yaitu sebesar 1,68 $\% \Delta k/k$. Nilai ini lebih besar 1,18 $\% \Delta k/k$ dibanding nilai batas sebesar 0,5 $\% \Delta k/k$. Untuk nilai FPD radial maksimum, seluruh teras alternatif memiliki nilai yang relatif sama yaitu dalam rentang 1,14 - 1,15. Nilai ini menunjukkan bahwa kerataan pembangkitan panas di 3 (tiga) teras alternatif sangat baik karena panas maksimum hanya 14%-15% dibanding nilai panas rerata. Nilai FPD ini jauh lebih kecil dibandingkan dengan nilai yang dimiliki oleh reaktor RSG-GAS sebesar 1,29.

KESIMPULAN

Tiga teras alternatif yang dikaji memenuhi persyaratan kriteria pengguna yaitu menghasilkan fluks neutron termal dalam orde 10^{15} neutron $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$. Akan tetapi jika ditinjau dari aspek keselamatan, kerapatan panas dan margin padam, dan efisiensi serta efektifitas reaktor, maka teras Alternatif-2, yaitu menggunakan ukuran bahan bakar seperti yang dipakai reaktor JMTR dengan tinggi aktif 70 cm, merupakan teras alternatif yang terbaik dibandingkan dengan dua teras lainnya. Oleh karena itu, teras Alternatif-2 ini diusulkan sebagai teras reaktor RRI.

DAFTAR ACUAN

1. Teruel F.E., Rizwan-uddin. An innovative research reactor design. Nuclear Engineering and Design 2009; 239:395-407.
2. Seo C.G., Cho N.Z. A core design concept for multi-purpose research reactors. Nuclear Engineering and Design 2012; 252:34-41.
3. Raina V.K., Sasidharan K., Sengupta S., Singh T. Multi purpose research reactor. Nuclear Engineering and Design 2006; 236:770-783.
4. BATAN. *Criteria Document (UCD) Reaktor Riset Inovatif*, BATAN-RKN-06-2010, 2010.
5. Tukiran, Pinem S., Sembiring, T.M., Suparlina L. Susilo S. Desain konseptual teras Reaktor Riset Inovatif berbahan bakar uranium molibdenum dari aspek neutronik. J. Tek. Reaktor Nuklir, 2012; Vol. 14 No. 3 178 – 191.
6. Pinem S. Desain neutronik teras reaktor riset inovatif berbahan bakar tingkat muat tinggi. Laporan Akhir Program PI-PKPP, 2011
7. Inaba et. al. Feasibility study on cryogenic irradiation facility in JMTR. Fusion Engineering and Design 2011; 86:134-140
8. BATAN. Safety Analysis Report of the Indonesian Multipurpose Reactor GA-Siwabessy, Rev.8, 1999.
9. WIMS-D5, OECD/NEA Data Bank Documentation, Package ID No. 1507/02 , 1998
10. Liem, P.H., BATAN-FUEL: A general in-core fuel management code. J. Atom Indonesia 1996; Vol. 22 No.2 : 67-80.
11. Liem, P.H. Development of BATAN's standard 3-D multigroup diffusion code (BATAN-3DIFF). Proc. 5-th Workshop of Computation in Nuclear Science and Technology, Batan, Jakarta, 1995.
12. JAEA. Activities of Research-Reactor-Technology Project in FNCA. Sharing neutronics calculation technique for core management and utilization of research reactors. JAEA-Review 2010-025, 2010.