

DESAIN KONSEPTUAL TERAS REAKTOR RISET INOVATIF BERBAHAN BAKAR URANIUM-MOLIBDENUM DARI ASPEK NEUTRONIK

Tukiran S, Surian Pinem, Tagor MS, Lily S, Jati Susilo
Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir, PTRKN-BATAN
Email: tukiran@batan.go.id

Diterima editor 03 September 2012
Disetujui untuk publikasi 05 Oktober 2012

ABSTRAK

DESAIN KONSEPTUAL TERAS REAKTOR RISET INOVATIF BERBAHAN BAKAR URANIUM MOLIBDENUM DARI ASPEK NEUTRONIK. Manfaat yang luas dari penggunaan reaktor riset membuat banyak negara membangun reaktor riset baru. Kecenderungan saat ini adalah reaktor tipe reaktor serbaguna (MPR) dengan teras yang kompak untuk mendapatkan fluks neutron yang tinggi dengan daya yang relatif sedang atau rendah. Reaktor riset yang ada di Indonesia yang paling muda usianya sudah berumur 25 tahun. Oleh karena itu diperlukan desain reaktor riset baru sebagai alternatif, disebut reaktor riset inovatif (RRI), kelak pengganti reaktor riset yang sudah ada. Tujuan dari riset ini mendapatkan konfigurasi teras setimbang reaktor riset yang optimal dengan kriteria memiliki fluks neutron termal minimum sebesar $2,5 \times 10^{14}$ n/cm² s pada daya 20 MW (minimum), memiliki panjang operasi satu siklus lebih dari 40 hari dan penggunaan bahan bakar yang paling efisien. Desain neutronik dilakukan untuk bahan bakar baru U-9Mo-Al dengan kerapatan bervariasi dan jenis reflektor yang bervariasi. Desain dilakukan dengan paket program WIMSD-5B dan BATAN-FUEL. Hasil desain konseptual menyajikan 4 konfigurasi teras yaitu 5×5, 5×7, 6×5 dan 6×6. Hasil optimasi menunjukkan bahwa teras setimbang reaktor RRI dengan konfigurasi 5×5, tingkat muat ²³⁵U sebesar 450 g, reflektor berilium, fluks neutron termal maksimum di daerah reflektor sebesar $3,33 \times 10^{14}$ neutron cm⁻²s⁻¹ dan panjang siklus 57 hari merupakan desain teras reaktor riset inovatif yang paling optimal.

Kata kunci: desain konseptual, bahan bakar uranium-molibdenum,berilium, D₂O, WIMS, BATAN-FUEL

ABSTRACT

NEUTRONICS CONCEPTUAL DESIGN OF THE INNOVATIVE RESEARCH REACTOR CORE USING URANIUM MOLIBDENUM FUEL. The multipurpose of research reactor utilization make many countries build the new research reactor. Trend of this reactor for this moment is multipurpose reactor type with a compact core to get high neutron flux at the low or medium level of power. The research newest reactor in Indonesia right now is already 25 year old. Therefore, it is needed to design a new research reactor, called innovative research reactor (IRR) and then as an alternative to replace the old research reactor. The aim of this research is to get the optimal configuration of equilibrium core with the acceptance criteria are minimum thermal neutron flux is $2.5E14$ n/cm² s at the power level of 20 MW (minimum), length of cycle of more than 40 days, and the most efficient of using fuel in the core. Neutronics design has been performed for new fuel of U-9Mo-Al with various fuel density and reflector. Design calculation has been performed using WIMSD-5B and BATAN-FUEL computer codes. The calculation result of the conceptual design shows four core configurations namely 5x5, 5x7, 6x5 and 6x6. The optimization result for equilibrium core of innovative research reactor is the 5x5 configuration with 450 gU fuel loading, berilium reflector, maximum thermal neutron flux at reflector is $3.33E14$ n/cm²s and length of cycle is 57 days is the most optimal of IRR.

Keywords: conceptual design, uranium-molibdenum-uranium fuel, berilium, D₂O, WIMS, BATAN-FUEL

PENDAHULUAN

Manfaat yang luas dari penggunaan reaktor riset membuat banyak negara membangun reaktor riset baru. Kecenderungan jenis reaktor yang telah beroperasi, dikonstruksi dan direncanakan sejak tahun 1980 adalah jenis reaktor serba guna (*multi-purpose reactor*) [1]. Hampir 60% dari reaktor tersebut menggunakan bahan bakar jenis pelat lurus (MTR, *Material Testing Reactor, type*). Daya termal yang beragam, 10 MW - 100 MW, serta jenis reflektor yang beragam, berilium, grafit, H₂O dan D₂O, digunakan dalam reaktor riset tersebut [1].

Setelah dibangunnya reaktor riset FRM-II (Jerman) dan reaktor riset CARR (Cina), maka desain reaktor serba guna memakai prinsip reaktor kompak (*compact core*). Prinsip reaktor kompak adalah mendesain area teras reaktor sekecil mungkin dengan kerapatan panas yang tinggi untuk mendapatkan fluks neutron termal yang tinggi di daerah reflektor [1-2]. Dengan demikian penggunaan reaktor untuk berbagai fungsi dapat dilakukan, tidak saja untuk produksi radio isotop tetapi juga berbagai industri [2].

Reaktor riset termuda di Indonesia sampai saat ini, yaitu reaktor RSG-GAS (Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy), dengan daya nominal 30 MWth, telah berusia 25 tahun (kritikalitas pertama 1987). Sedangkan 2 (dua) reaktor riset lainnya, tipe TRIGA, yaitu reaktor Kartini (Yogyakarta) dan reaktor TRIGA 2000 (Bandung) akan berakhir masa izin operasinya pada tahun 2016-2020. Oleh karena itu, setelah tahun 2020, pada saat izin operasi dihentikan, maka reaktor RSG-GAS sudah berusia 33 tahun. Hal ini perlu diantisipasi dengan melakukan kajian tentang desain reaktor riset baru di Indonesia.

Kajian tentang reaktor riset baru di Indonesia juga mempertimbangkan kondisi reaktor riset dunia. Pada saat ini 70 % reaktor yang beroperasi telah berumur lebih 30 tahun dan lebih dari 50 % telah beroperasi lebih dari 40 tahun [3]. Disamping itu utilisasi reaktor riset yang tidak maksimum (*underutilized*) di Indonesia, menjadi penentu penting pembangunan reaktor riset baru. Dengan mempertimbangkan hal di atas, maka desain reaktor riset baru perlu dilakukan saat ini, mengingat waktu yang diperlukan dalam desain cukup panjang dan juga tidak mudah. Sebelum dikonstruksi, desain konseptual, desain dasar dan desain detail harus dilakukan terlebih dahulu. Oleh karena itu, agar arah desain reaktor riset baru lebih jelas, maka telah dilakukan kajian kebutuhan pengguna jasa reaktor di Indonesia [4]. Hasil kajian menunjukkan reaktor riset baru yang akan dibangun di Indonesia harus didesain secara mandiri, jenis reaktor adalah serba guna, memiliki fluks neutron termal yang tinggi, fasilitas yang beragam (neutron cepat, tabung berkas dll.) dan berbahan bakar tipe baru yaitu UMo-Al [4].

Makalah ini menyajikan hasil riset tentang desain konseptual reaktor riset baru dari aspek neutronik, yang diberi nama reaktor riset inovatif (reaktor RRI). Disebut inovatif karena desain konseptual sampai dengan desain detail dilakukan secara mandiri dan bahan bakar yang digunakan bertipe seperti reaktor RSG-GAS yang sudah dapat diproduksi secara mandiri. Desain konseptual dari aspek neutronik merupakan langkah awal untuk mendapatkan desain konseptual secara menyeluruh. Tujuan dari riset ini mendapatkan konfigurasi teras setimbang reaktor riset yang optimal dengan kriteria memiliki fluks neutron termal minimum sebesar $2,5 \times 10^{14}$ n/cm²s pada daya 20 MW (minimum), memiliki panjang operasi satu siklus lebih dari 40 hari dan penggunaan bahan bakar yang paling efisien. Dalam desain konseptual ini dipakai kriteria keselamatan untuk kendali reaktivitas adalah *one stuck rod*, yaitu reaktor tetap subkritis pada saat batang kendali terbesar gagal masuk.

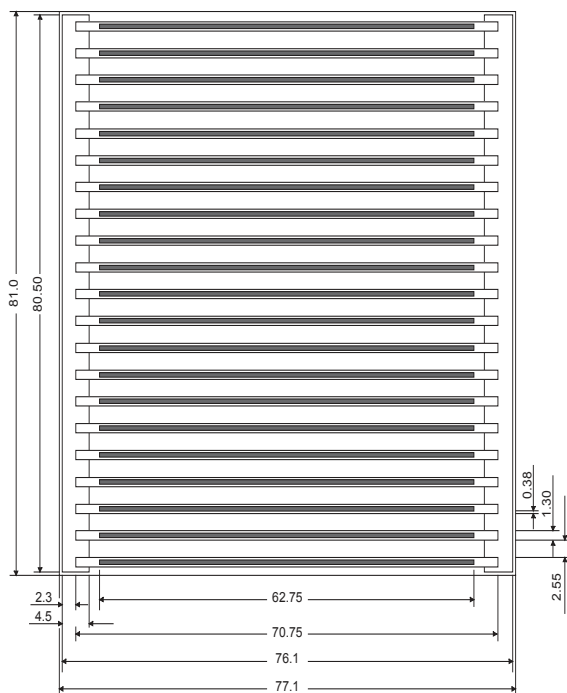
Perhitungan teras dilakukan dengan mencari teras setimbang dengan bahan bakar jenis baru UMo-Al. Teras setimbang diperoleh dengan paket program metode difusi neutron 2-dimensi, BATAN-FUEI [5]. Sedangkan generasi tampang lintang bahan bakar dilakukan dengan paket program transpor neutron WIMSD-5B [6] dengan data nuklir dari ENDF/B-VII.0 [7]. Dengan melakukan riset ini, maka desain konseptual dari aspek termohidrolik dapat dilakukan karena beberapa karakteristik seperti distribusi faktor puncak daya dan kerapatan panas maksimum dapat dilakukan.

PRINSIP DESAIN NEUTRONIK

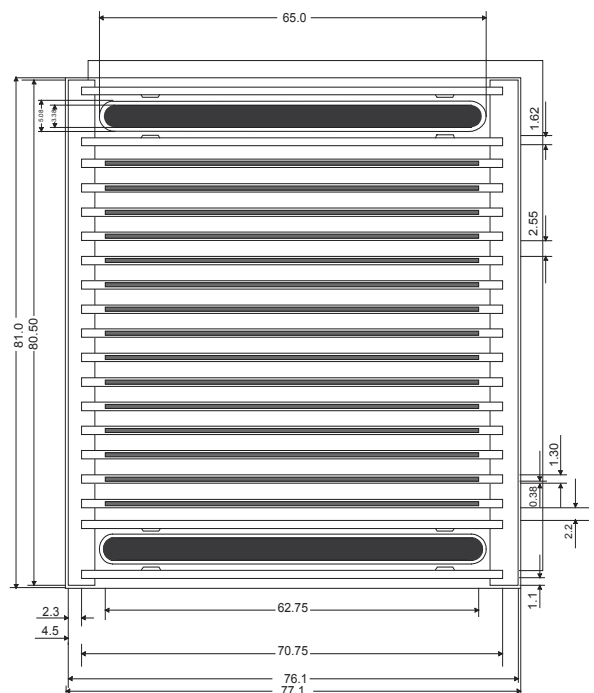
Bahan bakar memegang peranan penting dalam desain suatu reaktor. Berdasarkan UCD (*User Criteria Document*) reaktor RRI menggunakan tipe bahan bakar yang sama dengan reaktor RSG-GAS, yaitu tipe pelat lurus dengan dimensi 8,05 cm × 7,6 cm × 60 cm (tinggi aktif). Dengan demikian, kisi teras reaktor RRI sama dengan reaktor RSG-GAS yaitu 8,1 cm × 7,71 cm. Untuk pengendalian reaktivitas, batang kendali yang digunakan di reaktor RRI menggunakan tipe garpu (*fork type*) yang sama dengan reaktor RSG-GAS dengan material Ag-In-Cd diletakkan di 2 (dua) sisi terluar elemen bakar kendali. Jumlah pelat bahan bakar di elemen bakar standar (EB) dan kendali (EK) masing-masing 21 pelat dan 15 pelat. Tabel 1 menyajikan data geometri EB dan EK yang dipakai di reaktor RRI. Gambar 1 dan 2 masing-masing menunjukkan EB dan EK yang dipakai di reaktor RRI yang diadopsi dari reaktor RSG-GAS.

Tabel 1. Data geometri perangkat bahan bakar reaktor RRI [8]

Dimensi kisi teras untuk elemen bakar standar (EB) dan kendali (EK), cm	7,71 × 81 × 60,
Ketebalan pelat bahan bakar, cm	0,13
Lebar kanal pendingin, cm	0,255
Jumlah pelat bahan bakar di EB	21
Jumlah pelat bahan bakar di EK	15
Material kelongsong	AlMg2
Material pelat sisi	AlMg1
Ketebalan kelongsong bahan bakar, cm	0,038
Dimensi zona aktif (<i>meat</i>), cm	0,054 × 6,275 × 60
Material bahan bakar	U9Mo-Al
Muatan massa ²³⁵ U, g	450, 550 dan 700
Material penyerap	Ag-In-Cd
Ketebalan penyerap, cm	0,338
Material kelongsong penyerap	SS-321
Ketebalan kelongsong penyerap, cm	0,085



Gambar 1. Elemen bakar standar reaktor RRI [8]



Gambar 2. Elemen bakar kendali reaktor RRI [8]

Bahan bakar yang digunakan di reaktor RRI adalah U9Mo-Al dengan pengkayaan 19,75%. Agar dapat dioperasikan dengan panjang siklus yang panjang, maka tingkat muat uranium (^{235}U) dalam desain dipilih lebih tinggi dari yang dipakai di reaktor RSG-GAS yaitu:

1. 450 g ^{235}U atau kerapatan uranium dalam *meat* sebesar 5,34 g/cm³
2. 550 g ^{235}U atau kerapatan uranium dalam *meat* sebesar 6,52 g/cm³
3. 700 g ^{235}U atau kerapatan uranium dalam *meat* sebesar 8,30 g/cm³

Berkaitan dengan reflektor, reaktor RRI didesain untuk 3 jenis reflektor yaitu berilium (Be), air berat (D₂O) dan grafit. Untuk teras, dalam desain konseptual reaktor RRI dimungkinkan disediakan fasilitas iradiasi dalam teras. Selanjutnya untuk aspek pengendalian reaktivitas, maka dimungkinkan penggunaan *safety rod* (batang kendali pengaman) yang bentuknya sama dengan elemen kendali tanpa pelat bahan bakar tetapi menggunakan pelat dummy aluminium. Batang kendali pengaman diletakkan di teras.

METODOLOGI

Desain neutronik teras setimbang membutuhkan beberapa langkah perhitungan yaitu:

1. Perhitungan sel. Dalam penelitian ini dilakukan dengan paket program WIMSD-5B untuk membangkitkan seluruh konstanta difusi seluruh material teras dalam 4 (empat) kelompok tenaga neutron. Batas kelompok tenaga neutron adalah 10 MeV, 0,821 MeV, 5,531 keV, 0,625 eV dan 1×10^{-5} eV. Khusus untuk bahan bakar pembangkitan konstanta kelompok yang dibangkitkan sebagai fungsi massa ^{235}U dalam perangkat (450 g, 550 g dan 700 g), temperatur (dingin dan panas) dan kondisi Xe (tanpa *free*) dan setimbang).
2. Penyusunan konfigurasi teras. Konfigurasi teras yang dipilih adalah 5×5 (25 kisi teras), 5×7 (35 kisi teras), 6×5 (30 kisi teras) dan 6×6 (36 kisi teras). Seperti disinggung sebelumnya teras didesain kompak sehingga teras tidak melebihi 36 posisi kisi teras. Konfigurasi disusun dengan menjaga kelas fraksi bakar simetris untuk $\frac{1}{4}$ teras. Dengan demikian fasilitas untuk posisi iradiasi dan batang kendali pengaman disusun sedemikian agar simetris teras tetap dijaga.
3. Perhitungan teras. Perhitungan teras dilakukan untuk mendapatkan teras setimbang reaktor RRI. Perhitungan teras dilakukan dengan paket program BATAN-FUEL. Teras dimodelkan dalam 2-dimensi dengan model geometri X-Y. Dalam perhitungan ini, daya reaktor diasumsikan tetap yaitu 20 MWth untuk mengetahui efek konfigurasi terhadap fluks neutron dan panjang siklus operasi. Karena panjang siklus merupakan parameter yang mempengaruhi reaktivitas lebih teras, maka perhitungan teras dilakukan untuk rentang panjang siklus sedemikian sehingga kriteria *stuck rod* terpenuhi. Yang dimaksud dengan *stuck rod* adalah jika sebuah batang kendali yang memiliki nilai reaktivitas terbesar gagal dimasukkan ke teras, maka teras harus dalam kondisi sub-kritis. Jika kriteria *stuck rod* tidak terpenuhi, maka dimungkinkan untuk memakai batang kendali pengaman di teras. Untuk parameter faktor puncak daya (FPD), jika nilai FPD maksimum melebihi batas yang ditetapkan, maka rekonfigurasi posisi bahan bakar dan letak posisi iradiasi dalam teras perlu dilakukan sedemikian sehingga nilai FPD maksimum berkurang. Jika tidak, maka konfigurasi teras yang dimaksud dinyatakan tidak dapat didesain secara aman. Perhitungan teras dilakukan untuk setiap tingkat muat dan setiap jenis reflektor, Be, D₂O dan grafit. Asumsi yang dipakai dalam penelitian ini adalah:
 - *core shroud* tidak digunakan. Oleh karena itu reflektor bersinggungan langsung dengan daerah teras.
 - pendingin teras menggunakan H₂O.
 - saat kondisi panas (*full power*), seluruh material yang non bahan bakar dalam kondisi temperatur kamar.

Tabel 2 dan Gambar 3 masing-masing menunjukkan masukan dan keluaran paket program komputer yang digunakan dan diagram alir perhitungan.

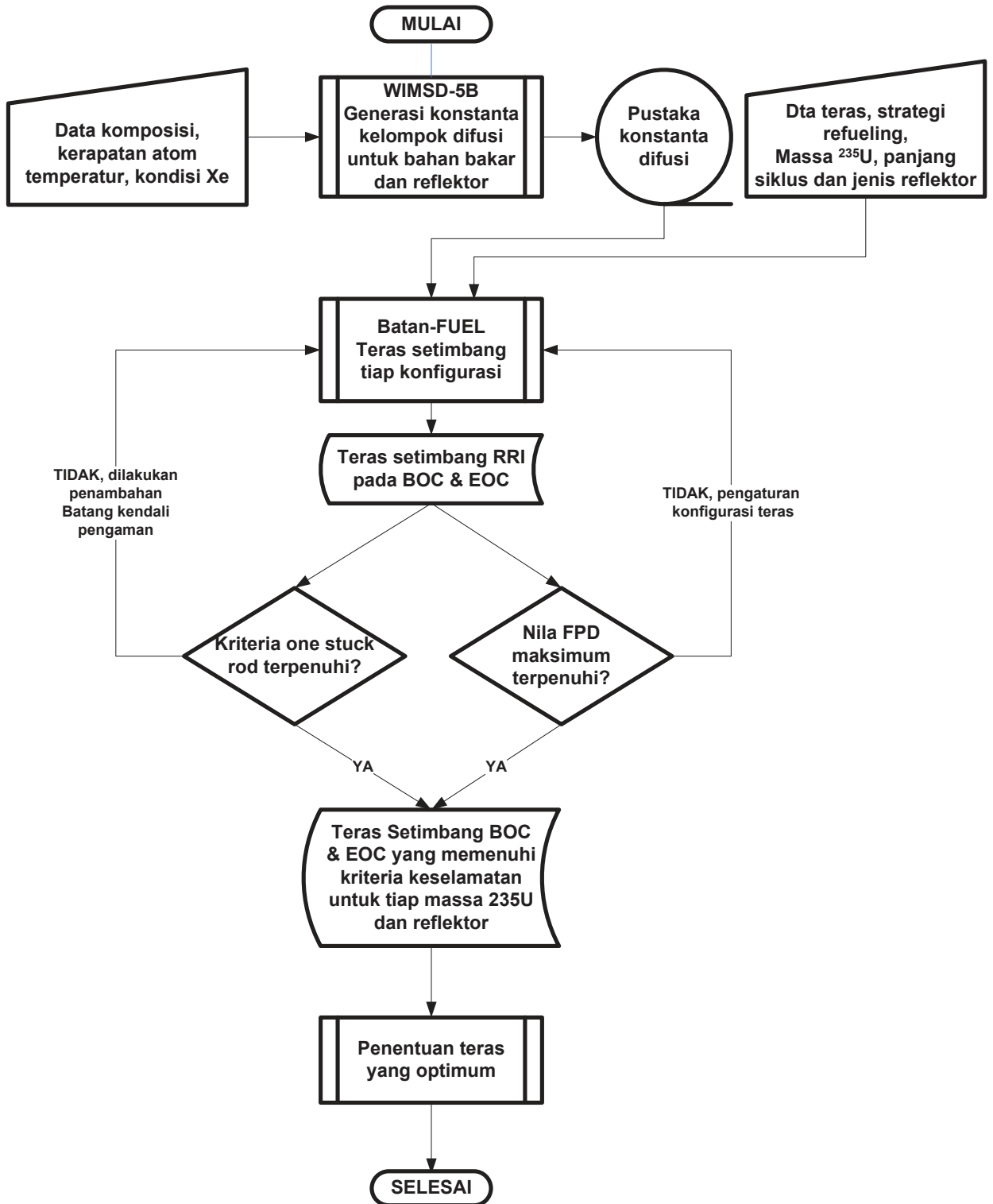
Konfigurasi teras setimbang dapat diterima jika memenuhi kriteria keselamatan yaitu:

1. margin padam minimum saat *stuck rod* adalah $-0,5 \% \Delta k/k$.
2. nilai FPD maksimum adalah 1,4.

Dua kriteria yang dipakai di atas diadopsi dari desain keselamatan yang digunakan di reaktor RSG-GAS [8-9].

Tabel 2. Data masukan dan keluaran yang dipakai dalam desain neutronik

Perhitungan	Masukan	Keluaran	Keterangan
Sel dengan WIMSD-5B	komposisi, kerapatan atom, temperatur untuk tiap material teras	Konstanta difusi berupa tampang lintang makrokopis dalam 4 kelompok tenaga neutron	Konstanta difusi untuk material bahan bakar sebagai fungsi temperatur, Xe dan massa ^{235}U
Penyusunan konfigurasi teras	<ul style="list-style-type: none"> - Pembagian bahan bakar dalam kelas fraksi bakar - Pengaturan posisi bahan bakar standar dan kendali - Posisi yang tersisa diisi dengan posisi iradiasi 	Teras yang sudah simetris kelas fraksi bakarnya untuk tiap $\frac{1}{4}$ bagian teras	Jumlah bahan bakar segar yang diperlukan selalu tetap untuk tiap siklus.
Teras dengan BATAN-FUEL	<ul style="list-style-type: none"> - Pola <i>reshuffle</i> dan panjang siklus - Pembagian <i>mesh</i> teras - Pendefinisian material teras 	Parameter neutronik teras: k_{eff} , distribusi faktor puncak daya, fraksi bakar maksimum, margin padam minimum, fluks neutron di fasilitas iradiasi	Teras setimbang dilakukan untuk berbagai panjang siklus. Batang kendali pengaman ditambah jika kondisi <i>stuck rod</i> tidak terpenuhi



Gambar 3. Diagram alir desain neutronik teras setimbang reaktor RRI

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Perhitungan Parameter Neutronik Teras Setimbang Reaktor RRI

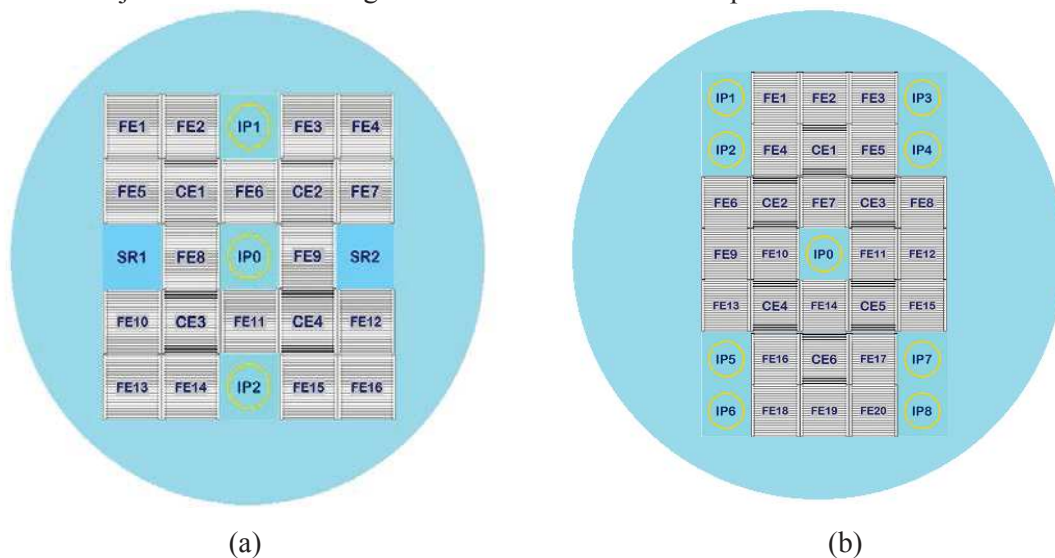
Berdasarkan hasil perhitungan, bentuk konfigurasi teras setimbang yang terpilih dinyatakan dalam Gambar 4-5. Konfigurasi teras 5×5, 5×7, 6×5 dan 6×6 masing-masing ditunjukkan dalam Gambar 4(a), 4(b), 5(a) dan 5(b). Hasil perhitungan teras setimbang reaktor RRI untuk seluruh konfigurasi teras, massa ²³⁵U dan tiap jenis reflektor dinyatakan dalam Tabel 3-10. Perlu dicatat bahwa jika margin padam minimum atau reaktivitas padam bernilai positif (+), maka data teras hasil perhitungan tidak ditampilkan dalam Tabel 3-10.

Konfigurasi teras 5×5, Gambar 4 dan Tabel 3-4, terdiri dari 16 elemen bakar standar (FE) dan 4 elemen bakar kendali (CE) serta 3 posisi iradiasi dalam teras (IP0, IP1 dan IP2). Tampak di Gambar 4 bahwa untuk seluruh jenis reflektor, Be, D2O dan grafit, diperlukan tambahan 2 (dua) batang kendali pengaman (*safety rod*), SR1 dan SR2.

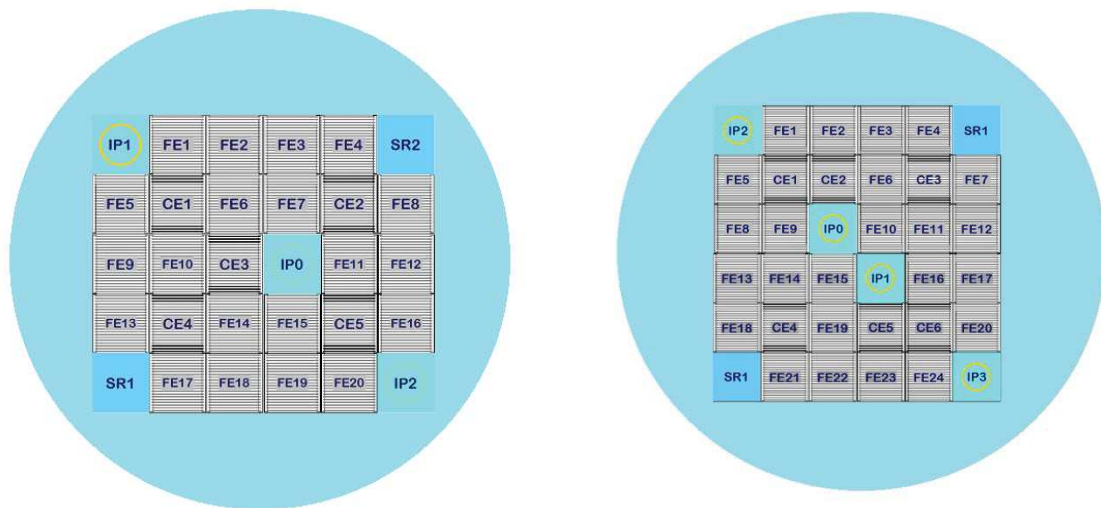
Tabel 3 juga menunjukkan bahwa dari aspek pengendalian reaktivitas, teras dengan reflektor Be memiliki nilai margin padam minimum (kondisi stuck rod) yang paling kecil dibanding teras dengan grafit dan D2O. Hal ini disebabkan karena reaktivitas lebih teras dengan Be yang paling besar sehingga dengan saat 1 CE mengalami gagal masuk ke teras memberikan nilai perlipatan efektif (untuk kondisi subkritis), keff, yang paling kecil. Hal ini terjadi untuk tingkat muat ²³⁵U 550 g dan 700 g. Tabel 3 menunjukkan bahwa kriteria keselamatan untuk margin padam minimum sebesar -0,5 %Δk/k tidak dapat dipenuhi untuk teras dengan reflektor Be untuk tingkat muat ²³⁵U sebesar 550 g dan 700 g per FE masing-masing dengan nilai -0,28 %Δk/k dan +1,96 %Δk/k. Hal ini disebabkan pergeseran spektrum neutron yang semakin keras (*harder*) akibat naiknya tingkat muat ²³⁵U di reflektor Be lebih besar dibanding grafit dan D2O. Akibatnya kemampuan serap batang kendali untuk neutron termal semakin berkurang.

Dari aspek operasi reaktor, tampak dalam Tabel 3 bahwa panjang siklus yang terbesar terjadi di teras dengan reflektor Be untuk seluruh tingkat muat ²³⁵U (kecuali pada tingkat 700 g), kemudian diikuti grafit dan D2O. Hal ini berkaitan dengan reaktivitas lebih yang dimiliki teras yang bereflektor Be lebih besar dibanding grafit dan D2O. Panjang siklus operasi dan reaktivitas lebih teras akan semakin besar nilainya jika tingkat muat ²³⁵U dalam FE semakin besar.

Dari aspek kerataan pembangkitan panas yang ditunjukkan dengan nilai FPD radial maksimum, terlihat jelas di Tabel 3 nilai FPD maksimum sangat dipengaruhi oleh jenis reflektor dan tingkat muat ²³⁵U. Perubahan nilai FPD akibat tingkat muat ²³⁵U dan jenis reflektor tidak menunjukkan suatu kecenderungan yang konsisten. Oleh karena itu faktor utama dalam penentuan nilai FPD maksimum adalah distribusi fraksi bakar FE dan CE disekitar posisi iradiasi (IP). Nilai FPD radial maksimum untuk seluruh jenis reflektor dan tingkat muat ²³⁵U lebih kecil dari pada nilai kriteria keselamatan 1,4.



Gambar 4. Konfigurasi teras RRI 5×5 (a) dan 5×7 (b)



(a) (b)
 Gambar 5. Konfigurasi teras RRI 6×5 (a) dan 6×6 (b)

Tabel 3. Parameter neutronik konfigurasi teras setimbang RRI 5 × 5

No.	Parameter	Tingkat muat 450 g			Tingkat muat 550 g			Tingkat muat 700 g		
		Reflektor luar teras			Reflektor luar teras			Reflektor luar teras		
		Be	D ₂ O	Grafit	Be	D ₂ O	Grafit	Be	D ₂ O	Grafit
1.	Daya (MW)	20	20	20	20	20	20	20	20	20
2.	Reaktivitas satu siklus (%Δk/k)	6,39	3,78	5,21	6,61	4,58	6,06	-	5,42	6,66
3.	Reaktivitas xenon (%Δk/k)	3.42	3,53	3,46	3,34	3,46	3,39	-	3,33	3,27
5.	Reaktivitas samarium (%Δk/k)	0,58	0,59	0,62	0,60	0,63	0,66	-	0,66	0,70
6.	Reaktivitas hot to cold (%Δk/k)	0,39	0,42	0,42	0,37	0,40	0,41	-	0,39	0,39
7.	Reaktivitas lebih (%Δk/k)	12,28	10,06	11,41	13,41	10,55	11,95	-	11,30	12,46
8.	Margin padam minimum (%Δk/k)	-2,26	-5,32	-3,69	-0,28	-4,09	-2,36	+1,98	-2,37	-0,96
9.	Reaktivitas batang kendali total (%Δk/k)	-19,67	-21,43	-21,22	-18,75	-20,08	-19,86	-	-18,48	-18,34
10.	Reaktivitas padam (%Δk/k)	,-7,39	-10,37	-9,81	-5,31	-9,53	-7,91	-	-7,18	-5,88
11.	Panjang siklus (hari)	57	40	48	72	50	65	-	75	92
12.	Fraksi bakar maksimum (%)	66	46	58	68	49	62	-	57	68
13.	PPF radial maksimum	1.15	1.18	1.22	1.17	1.19	1.17	-	1.17	1.19
14.	Kerapatan daya rerata di teras (W/cm ³)	309	309	309	309	309	309	-	309	309

Tabel 4 menunjukkan fluks neutron maksimum di konfigurasi teras 5x5 pada posisi tengah teras (IP), reflektor luar tepi teras (4 cm dari tepi teras) dan reflektor luar (di luar batas 4 cm dari teras) masing-masing untuk energi termal ($\leq 0,625$ eV), epitermal ($0,625 \geq E \geq 0,821$ MeV) dan cepat (≤ 10 MeV). Tampak jelas ada kecenderungan yang konsisten untuk fluks neutron di posisi tengah teras (IP) yaitu yang tertinggi pada penggunaan reflektor grafit kemudian diikuti oleh D2O dan Be. Kecenderungan ini sama untuk semua tingkat muat 235U. Kecenderungan semakin turun fluks neutron akibat naiknya tingkat muat dapat dimengerti karena dengan daya yang sama fluks neutron

berbanding terbalik dengan naiknya tampang lintang $v\Sigma_f$ (yang setara dengan naiknya tingkat muat 235U).

Fluks neutron maksimum yang berada di reflektor di dekat tepi teras, memiliki nilai tertinggi jika teras menggunakan reflektor Be yang diikuti oleh grafit dan D₂O. Hal yang sama juga terjadi untuk fluks neutron maksimum di reflektor luar, yaitu teras dengan Be memiliki nilai yang tertinggi. Akan tetapi teras dengan reflektor D₂O memiliki fluks neutron maksimum di seluruh reflektor yang lebih tinggi dibanding teras dengan reflektor grafit. Hal ini menunjukkan bahwa reflektor grafit memiliki gradien penurunan fluks ke arah radial batas luar teras yang terbesar jika dibanding D₂O dan Be sehingga luas daerah fluks neutron yang tinggi di reflektor relatif lebih kecil.

Tabel 4. Fluks neutron maksimum untuk konfigurasi teras setimbang RRI 5 × 5

No.	Posisi	Tingkat muat 450 g			Tingkat muat 550 g			Tingkat muat 700 g		
		Reflektor luar teras			Reflektor luar teras			Reflektor luar teras		
		Be	D ₂ O	Grafit	Be	D ₂ O	Grafit	Be	D ₂ O	Grafit
1	Fluks neutron maksimum tengah teras (10^{14}n/cm²s)									
	Termal	3,56	3,70	3,82	3,35	3,53	3,64	-	3,31	3,43
	Epitermal	2,33	2,55	2,63	2,32	2,50	2,56		2,45	2,56
	Cepat	1,18	1,29	1,28	1,16	1,27	1,27		1,25	1,29
2	Fluks neutron maksimum di tepi teras (10^{14}n/cm²s)									
	Termal	3,33	2,87	3,03	3,18	2,79	2,93	-	2,67	2,82
	Epitermal	1,80	2,27	2,20	2,15	1,86	2,26		1,97	2,25
	Cepat	0,73	1,03	0,83	0,85	0,67	0,96		0,79	0,96
3	Fluks neutron maksimum di reflektor luar (10^{14}n/cm²s)									
	Termal	2,34	1,86	1,54	2,23	1,82	1,49	-	1,75	1,42
	Epitermal	1,06	0,85	1,24	1,04	0,88	1,25		0,88	1,25
	Cepat	0,12	0,06	0,19	0,11	0,06	0,18		0,06	0,18

Tabel 5-10 menunjukkan bahwa hanya konfigurasi teras 5 × 7 yang tidak membutuhkan batang kendali pengaman (safety rod). Hal ini menunjukkan bahwa sebanyak 6 batang kendali memiliki nilai margin padam minimum yang cukup untuk memadamkan reaktor kecuali pada tingkat muat 235U 700 g (Tabel 5). Seperti dibahas sebelumnya, tampak jelas bahwa teras dengan reflektor Be cenderung memiliki reaktivitas lebih teras yang besar dan pergeseran spektrum neutron ke daerah tenaga cepat juga besar sehingga batang kendali yang ada tidak cukup memberikan margin padam minimum. Hal yang sama terjadi juga pada konfigurasi teras 6 × 5. Sedangkan untuk konfigurasi teras 6×6 pada tingkat muat 235 U 700 g, nilai reaktivitas padam yang bernilai positif. Khusus untuk konfigurasi teras 6×5 dengan reflektor, margin padam minimumnya juga bernilai positif.

Seluruh kecenderungan parameter neutronik, yang berkaitan dengan pengendalian reaktivitas, operasi dan fluks neutron, seperti yang telah dibahas sebelumnya untuk konfigurasi teras 5 × 5 memiliki kecenderungan yang sama untuk 3 (tiga) konfigurasi teras lainnya. Akan tetapi yang berbeda adalah nilainya. Yang berbeda adalah untuk nilai FPD radial maksimum. Nilai ini ternyata sangat sensitif dengan konfigurasi teras khususnya posisi fasilitas iradiasi di teras (IP). Konfigurasi teras 6×5 memiliki nilai FPD yang lebih tinggi dibanding dengan konfigurasi teras lainnya. Nilai FPD maksimumnya dapat mencapai 1,38 (reflektor grafit) walau masih lebih kecil dibanding nilai batas keselamatan 1,4.

Tabel 4,6,8 dan 10 menunjukkan bahwa fluks neutron maksimum yang tertinggi untuk daerah reflektor luar diperoleh di teras dengan konfigurasi 5×5. Hal ini terjadi karena pada daya yang sama, maka semakin kecil volume teras, maka semakin tinggi nilai fluks neutron. Akan tetapi untuk fluks neutron maksimum di dalam teras (IP) konfigurasi teras 6 × 5 memberikan nilai yang tertinggi dibanding konfigurasi teras lainnya. Hal ini dipengaruhi letak posisi IP di tengah teras relatif jauh ke posisi IP lainnya, sehingga naiknya fluks neutron menjadi lebih tinggi.

Tabel 5. Parameter neutronik konfigurasi teras setimbang RRI 5 × 7

No.	Parameter	Tingkat muat 450 g			Tingkat muat 550 g			Tingkat muat 700 g		
		Reflektor luar teras			Reflektor luar teras			Reflektor luar teras		
		Be	D ₂ O	Grafit	Be	D ₂ O	Grafit	Be	D ₂ O	Grafit
1.	Daya (MW)	20	20	20	20	20	20	20	20	20
2.	Reaktivitas satu siklus (%Δk/k)	4,940	3,720	4,637	5,31	4,23	5,10		4,62	5,46
3.	Reaktivitas xenon (%Δk/k)	3,477	3,536	3,489	3,41	3,47	3,42		3,35	3,31
5.	Reaktivitas samarium (%Δk/k)	0,660	0,688	0,678	0,71	0,72	0,72		0,77	0,76
6.	Reaktivitas hot to cold (%Δk/k)	0,427	0,42	0,451	0,42	0,41	0,44		0,44	0,43
7.	Reaktivitas lebih (%Δk/k)	10,77	9,67	10,51	11,32	10,18	10,93		10,48	11,18
8.	Margin padam minimum (%Δk/k)	-2,48	-4,46	-3,60	-1,00	-3,09	-2,23	+0,12	-1,67	-0,89
9.	Reaktivitas batang kendali total (%Δk/k)	-17,26	-18,75	-18,46	-15,97	-17,40	-17,12		-15,88	-17,87
10.	Reaktivitas padam (%Δk/k)	-6,48	-9,08	-7,958	-4,65	-7,22	-6,19		-5,40	-6,69
11.	Panjang siklus (hari)	57	46	54	75	63	72		87	98
12.	Fraksi bakar maksimum (%)	72	62	70	65	67	75		71	78
13.	PPF radial maksimum	1,23	1,23	1,27	1,24	1,24	1,27		1,24	1,27
14.	Kerapatan daya rerata di teras (W/cm ³)	219,7	219,7	219,7	219,7	219,7	219,7		219,7	219,7

Tabel 6. Fluks neutron maksimum untuk konfigurasi teras setimbang RRI 5x7

No.	Posisi	Tingkat muat 450 g			Tingkat muat 550 g			Tingkat muat 700 g		
		Reflektor luar teras			Reflektor luar teras			Reflektor luar teras		
		Be	D ₂ O	Grafit	Be	D ₂ O	Grafit	Be	D ₂ O	Grafit
1	Fluks neutron maksimum tengah teras (10¹⁴n/cm²s)									
	Termal	3,66	3,81	3,81	3,49	3,64	3,65	-	3,46	3,47
	Epitermal	2,27	2,39	2,34	2,20	2,34	2,32		2,30	2,28
	Cepat	1,17	1,26	1,24	1,16	1,23	1,21		1,21	1,19
2	Fluks neutron maksimum di tepi teras (10¹⁴n/cm²s)									
	Termal	2,80	2,52	2,72	2,73	2,49	2,67	-	2,43	2,61
	Epitermal	2,30	2,05	2,16	2,16	2,02	2,08		1,99	2,07
	Cepat	1,03	0,97	1,06	1,02	0,96	1,05		0,95	1,03
3	Fluks neutron maksimum di reflektor luar (10¹⁴n/cm²s)									
	Termal	1,77	1,43	1,29	1,72	1,39	1,26	-	1,35	1,22
	Epitermal	1,57	1,31	1,47	1,55	1,31	1,48		1,30	1,46
	Cepat	0,29	0,21	0,38	0,28	0,20	0,37		0,20	0,37

Tabel 7. Parameter neutronik konfigurasi teras setimbang RRI 6 × 5

No.	Parameter	Tingkat muat 450 g			Tingkat muat 550 g			Tingkat muat 700 g		
		Reflektor luar teras			Reflektor luar teras			Reflektor luar teras		
		Be	D ₂ O	Grafit	Be	D ₂ O	Grafit	Be	D ₂ O	Grafit
1.	Daya (MW)	20	20	20	20	20	20	20	20	20
2.	Reaktivitas satu siklus (%Δk/k)	6,265	4,572	5,679	6,54	5,06	5,95		5,06	
3.	Reaktivitas xenon	3,423	3,503	3,442	3,36	3,43	3,37		3,31	

	(%Δk/k)									
5.	Reaktivitas samarium (%Δk/k)	0,630	0,643	0,636	0,66	0,67	0,66		0,71	
6.	Reaktivitas hot to cold (%Δk/k)	0,417	0,454	0,442	0,41	0,45	0,44		0,44	
7.	Reaktivitas lebih (%Δk/k)	11,916	10,408	11,476	12,498	10,80	12,05		11,21	
8.	Margin padam minimum (%Δk/k)	-1,685	-3,191	-2,621	-0,31	-0,81	-1,23	+0,62	-0,768	+0,67
9.	Reaktivitas batang kendali total (%Δk/k)	-14,23	-15,31	-15,34	-15,55	-14,29	-16,85		-17,96	
10.	Reaktivitas padam (%Δk/k)	-2,31	-4,902	-3,865	-3,05	-3,49	-4,80		-6,75	
11.	Panjang siklus (hari)	62	50	58	80	67	75		90	
12.	Fraksi bakar maksimum (%)	74	63	71	77	68	74		70	
13.	PPF radial maksimum	1,35	1,24	1,33	1,38	1,26	1,34		1,29	
14.	Kerapatan daya rerata di teras (W/cm ³)	226,4	226,4	226,4	226,4	226,4	226,4		226,4	

Tabel 8. Fluks neutron maksimum untuk konfigurasi teras setimbang RRI 6×5

No.	Posisi	Tingkat muat 450 g			Tingkat muat 550 g			Tingkat muat 700 g		
		Reflektor luar teras			Reflektor luar teras			Reflektor luar teras		
		Be	D ₂ O	Grafit	Be	D ₂ O	Grafit	Be	D ₂ O	Grafit
1	Fluks neutron maksimum tengah teras (10¹⁴n/cm²s)									
	Termal	3,97	4,21	4,22	3,80	4,04	4,05	-	3,86	-
	Epitermal	2,12	2,24	2,38	2,21	2,29	2,18		2,14	
	Cepat	1,11	1,22	1,21	1,10	1,18	1,18		1,16	
2	Fluks neutron maksimum di tepi teras (10¹⁴n/cm²s)									
	Termal	3,02	2,44	2,70	2,94	2,40	2,65	-	2,35	-
	Epitermal	2,27	2,05	2,27	2,29	2,04	2,25		2,02	
	Cepat	1,03	0,91	1,07	1,02	0,90	1,06		0,90	
3	Fluks neutron maksimum di reflektor luar (10¹⁴n/cm²s)									
	Termal	1,95	1,48	1,37	1,90	1,44	1,31	-	1,36	-
	Epitermal	1,69	1,39	1,64	1,69	1,36	1,06		1,33	
	Cepat	0,31	0,22	0,41	0,31	0,21	0,40		0,21	

Tabel 9. Parameter neutronik konfigurasi teras setimbang RRI 6 × 6

No.	Parameter	Tingkat muat 450 g			Tingkat muat 550 g			Tingkat muat 700 g		
		Reflektor luar teras			Reflektor luar teras			Reflektor luar teras		
		Be	D ₂ O	Grafit	Be	D ₂ O	Grafit	Be	D ₂ O	Grafit
1.	Daya (MW)	20	20	20	20	20	20	20	20	20
2.	Reaktivitas satu siklus (%Δk/k)	5,56	4,47	5,30	5,80	4,84	5,74		5,12	6,01
3.	Reaktivitas xenon (%Δk/k)	3,42	3,49	3,4	3,37	2,92	3,47		3,32	3,27
5.	Reaktivitas samarium (%Δk/k)	0,6	0,6	0,6	0,59	0,44	0,43		0,44	0,43
6.	Reaktivitas hot to cold (%Δk/k)	0,45	0,44	0,40	0,79	0,71	0,70		0,70	0,73
7.	Reaktivitas lebih (%Δk/k)	11,40	10,20	11,20	11,7	10,62	11,39		10,9	11,68
8.	Margin padam minimum (%Δk/k)	-4,77	-1,01	-2,70	-2,33	-1,75	-1,18		-0,79	-2,44
9.	Reaktivitas batang kendali total (%Δk/k)	-16,17	-16,95	-17,30	-15,42	-16,13	-16,53		-15,11	-15,51
10.	Reaktivitas padam (%Δk/k)	-4,77	-6,75	-6,1	-3,72	-5,51	-5,14	+6,40	-4,21	-3,83
11.	Panjang siklus (hari)	68	59	66	89	78	87		105	116
12.	Fraksi bakar maksimum (%)	67	58,5	65,7	70,9	69,8	77,4		72,5	72,1
13.	PPF radial maksimum	1,20	1,20	1,20	1,3	1,3	1,3		1,3	1,3
14.	Kerapatan daya rerata di teras (W/cm ³)	187	187	187	187	187	187		187	187

Tabel 10. Fluks neutron maksimum untuk konfigurasi teras setimbang RRI 6×6

No.	Posisi	Tingkat muat 450 g			Tingkat muat 550 g			Tingkat muat 700 g		
		Reflektor luar teras			Reflektor luar teras			Reflektor luar teras		
		Be	D ₂ O	Grafit	Be	D ₂ O	Grafit	Be	D ₂ O	Grafit
1	Fluks neutron maksimum tengah teras (10¹⁴n/cm²s)									
	Termal	3,00	3,28	3,22	2,92	3,21	3,18	-	3,08	3,05
	Epitermal	1,71	1,84	1,81	1,30	1,43	1,42		1,41	1,35
	Cepat	0,77	0,83	0,81	0,59	0,65	0,64		0,64	0,63
2	Fluks neutron maksimum di tepi teras (10¹⁴n/cm²s)									
	Termal	2,39	2,21	2,38	2,38	1,65	1,77	-	1,58	1,71
	Epitermal	1,04	0,98	1,08	0,62	0,63	0,70		0,62	0,69
	Cepat	0,42	0,40	0,45	0,23	0,23	0,28		0,23	0,27
3	Fluks neutron maksimum di reflektor luar (10¹⁴n/cm²s)									
	Termal	1,50	1,22	1,13	1,41	0,87	1,07	-	1,05	1,02
	Epitermal	1,26	1,08	1,26	0,69	0,75	0,75		0,60	0,70
	Cepat	0,20	0,14	0,28	0,20	0,14	0,22		0,14	0,18

Pemilihan Teras Setimbang Optimum

Dalam menentukan teras yang setimbang optimum maka digunakan aspek utilisasi (fluks neutron di daerah reflektor) dan aspek termohidrolika (kerapatan panas rerata di teras) sebagai acuan untuk melakukan pemilihan. Aspek lainnya, seperti pengendalian reaktivitas, dinyatakan sudah memenuhi kriteria keselamatan sesuai dengan pembahasan sebelumnya.

Berdasarkan hasil perhitungan teras, Tabel 3-10, terlihat jelas bahwa jika ingin memanfaatkan fluks neutron di reflektor untuk fasilitas iradiasi maka konfigurasi 5×5 menjadi pilihan utama diikuti oleh konfigurasi teras 6×5 , 5×7 dan 6×6 . Dalam hal ini, teras dengan reflektor Be dengan tingkat muat ^{235}U 450 g yang memiliki fluks neutron termal yang tertinggi, yaitu $3,33 \times 10^{14}$ n/cm²s (Tabel 4) dibanding reflektor lainnya. Berdasarkan Tabel 4, teras dengan reflektor D₂O dan grafit masing-masing memiliki fluks neutron termal lebih kecil 14% dan 9% dibanding reflektor Be. Kalau dibanding dengan reaktor sejenis dengan daya yang sama seperti desain reaktor MPR dari BARC (*Bhabha Atomic Research Center*) [10], maka fluks maksimum teras yang didesain ini memiliki fluks neutron yang lebih tinggi 66%.

Dari aspek termohidrolika, konfigurasi teras 5×5 memiliki kerapatan daya rerata di teras yang maksimum dengan nilai 309 W/cm³ dibanding konfigurasi teras lainnya. Nilai ini 76% lebih tinggi dari pada yang dimiliki reaktor RSG-GAS [8]. Hal ini diakibatkan penggunaan jumlah bahan bakar yang sebanyak 16 FE dan 4 CE untuk daya 20 MW dibanding reaktor RSG-GAS dengan jumlah 40 FE dan 8 CE untuk daya 30 MW. Akan tetapi, kalau dibanding dengan teras sejenis yang sudah beroperasi yaitu reaktor CARR (*China Advanced Research Reactor*), maka nilai daya rerata yang terjadi di desain teras ini lebih kecil 55%, karena reaktor CARR memiliki kerapatan daya rerata di teras sebesar 564 W/cm³ [11].

Disamping itu, konfigurasi teras 5×5 memiliki kebutuhan bahan bakar segar yang paling sedikit, yang berdampak positif dari biaya bahan bakar yang dibutuhkan per tahun. Hal ini tentu menjadi penting dari aspek ekonomi dan kemudahan penanganan bahan bakar.

KESIMPULAN

Hasil penelitian ini telah mengusulkan 4 (empat) konfigurasi teras reaktor riset inovatif (RRI) berdaya termal 20 MW yang memenuhi syarat keselamatan dengan menggunakan bahan bakar U-⁹²Mo-Al dengan tingkat muat ^{235}U minimum 450 g dan panjang siklus minimum 40 hari (800 MWD) untuk 3 jenis reflektor Be, D₂O serta grafit. Berdasarkan hasil optimasi yang fokus utamanya dari kemampuan maksimum utilisasi, maka konfigurasi teras setimbang dengan 5×5 dengan tingkat muat ^{235}U sebesar 450 g serta reflektor Be adalah teras setimbang yang optimal. Disamping fluks neutron termal maksimum di daerah reflektor sebesar $3,33 \times 10^{14}$ n/cm²s, margin padam minimum -2,26 % $\Delta k/k$ (*stuck rod*) dan panjang siklus 57 hari, juga memiliki fasilitas iradiasi di dalam teras dengan fluks neutron termal maksimum sebesar $3,56 \times 10^{14}$ n/cm²s.

UCAPAN TERIMAKASIH

Dalam kesempatan ini kami juga mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Riset dan Teknologi yang telah menyediakan dana dalam pelaksanaan penelitian ini melalui Program Insentif PKPP (Peningkatan Kesejahteraan Peneliti dan Perekayasa) tahun 2012.

DAFTAR PUSTAKA

1. V.K., Raina, K. Sasidharan, Samiran Sengupta, Tej Singh. Multi Purpose Reactor. Nucl. Eng. April 2006 ; 7-8: 770-783
2. Teruel, F.E, Rizwan-uddin. An innovative research reactor design. Nucl. Eng. Des. 2009; 239: 395-407
3. IAEA, 2010. Tersedia di web pada <http://www.iaea.org/worldatom/rrdb/>.
4. Hastuti, E.P., Setiyanto. Perencanaan Reaktor Riset Inovatif Sebagai Solusi Pengganti Reaktor Penelitian dan Produksi Isotop di Indonesia. Prosiding Seminar Nasional Energi Nuklir; PPEN-BATAN 2010
5. Liem, P.H., Batan-FUEL: A General In-Core Fuel Management Code. Atom Indonesia 1996, 22, No. 2.

6. WIMS-D5. OECD/NEA Data Bank Documentation, Package ID No. 1507/02; 1998
7. IAEA. WIMS-D Library Update. IAEA, Vienna, 2007.
8. BATAN. Laporan Analisis Keselamatan Rev. 10. BATAN, 2010.
9. Liem, P.H., Sembiring, T.M. Design of transition cores of RSG GAS (MPR-30) with higher loading silicide fuel. Nucl. Eng. Des. 2010; 240: 1433-1442
10. Raina, V.K., Sasidharan, K., Sengupta, S., Singh, T. Multi purpose research reactor. Nucl. Eng. Des. 2006; 236: 770-783
11. IAEA. Characterization and testing of materials for nuclear reactors. IAEA-TECDOC-1545, Vienna:IAEA;2007;p.65.