

## ANALISIS POLA MANAJEMEN BAHAN BAKAR TERAS REAKTOR RISET TIPE MTR

Lily Suparlina, Tukiran Surbakti  
Pusat Teknologi Keselamatan Reaktor Nuklir, PTKRN-BATAN  
Kawasan PUSPIPTEK Gd. No. 80 Serpong Tangerang Selatan 15310  
Email: [lilyrsg@batan.go.id](mailto:lilyrsg@batan.go.id)

Diterima editor 23 April 2014  
Disetujui untuk publikasi 4 Juni 2014

### ABSTRAK

**ANALISIS POLA MANAJEMEN BAHAN BAKAR DESAIN TERAS REAKTOR RISET TIPE MTR.** Parameter neutronik dibutuhkan dalam mendesain teras reaktor riset. Reaktor riset jenis MTR (**Material Testing Reactor**) sangat diminati karena dapat digunakan baik untuk riset dan juga produksi radio isotop. Reaktor riset yang ada saat ini sudah tua sehingga dibutuhkan desain reaktor yang mempunyai teras kompak. Desain teras reaktor riset yang sudah ada saat ini belum cukup memadai untuk memenuhi persyaratan di dalam UCD yang telah ditetapkan yaitu fluks neutron termal di teras  $1 \times 10^{15}$  n/cm<sup>2</sup>s, oleh karena itu perlu dibuat desain teras reaktor baru sebagai alternatif yang kompak dan dapat menghasilkan fluks neutron tinggi. Telah dilakukan perhitungan dan analisis terhadap manajemen bahan bakar desain teras kompak dengan konfigurasi teras 5x5, berbahan bakar U9Mo-Al dan tinggi teras aktif 70 cm. Tujuan dari riset ini untuk memperoleh fluks neutron di teras memenuhi kebutuhan seperti yang telah ditetapkan di UCD dengan panjang siklus operasi minimum 20 hari pada daya 50 MW. Perhitungan dilakukan dengan menggunakan paket program komputer WIMSD-5B untuk menggenerasi tampang lintang makroskopik bahan bakar dan Batan-FUEL untuk memperoleh nilai parameter neutronik serta Batan-3DIFF untuk perhitungan nilai reaktivitas batang kendali. Perhitungan parameter neutronik teras reaktor riset ini dilakukan untuk bahan bakar U-9Mo-Al dengan tingkat muat bervariasi dan 2 macam pola pergantian bahan bakar yaitu teras segar dan teras setimbang. Hasil analisis menunjukkan bahwa pada teras segar, tingkat muat <sup>235</sup>U sebesar 360 gram, 390 gram dan 450 gram memenuhi kriteria keselamatan dan kriteria penerimaan di UCD dengan nilai fluks neutron termal di teras lebih dari  $1 \times 10^{15}$  n/cm<sup>2</sup>s dan panjang siklus >20 hari, sedangkan pada teras setimbang panjang siklus dapat terpenuhi hanya untuk tingkat muat 450 gram.

Kata kunci: desain teras reaktor, bahan bakar UMo, pola bahan bakar, WIMS, BATAN-FUEL

### ABSTRACT

**ANALYSIS OF FUEL MANAGEMENT PATTERN OF RESEARCH REACTOR CORE OF THE MTR TYPE DESIGN.** Research reactor core design needs neutronics parameter calculation use computer codes. Research reactor MTR type is very interested because can be used as research and also a radioisotope production. The research reactor in Indonesia right now is already 25 years old. Therefore, it is needed to design a new research reactor as a compact core. Recent research reactor core is not enough to meet criteria acceptance in the UCD which already determined namely thermal neutron flux in the core is  $1.0 \times 10^{15}$  n/cm<sup>2</sup>s. so that it is necessary to be redesign the alternative core design. The new research reactor design is a MTR type with 5x5 configuration core, uses U9Mo-Al fuel, 70 cm of height and uses two certainly fuel management pattern. The aim of this research is to achieve neutron flux in the core to meet the criteria acceptance in the UCD. Calculation is done by using WIMSD-B, Batan-FUEL and Batan-3DIFF codes. The neutronic parameters to be achieved by this calculation are the power level of 50 MW thermal and core cycle of 20 days. The neutronics parameter calculation is done for new U-9Mo-Al fuel with variation of densities. The result of calculation showed that the fresh core with 5x5 configuration, 360 gram, 390 gram and 450 gram of fuel loadings have meet safety margin and acceptance criteria in the UCD at the thermal neutron flux is more than  $1.0 \times 10^{15}$  n/cm<sup>2</sup>s. But for equilibrium core is only the 450 gram of loading meet the acceptance criteria.

Keywords: reactor core design, UMo, fuel management pattern, WIMS, BATAN-FUEL

## PENDAHULUAN

Saat ini Indonesia mempunyai 3 buah reaktor riset yang sudah tua umurnya. Salah satu reaktor yang paling muda, yaitu reaktor RSG-GAS (Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy), telah 27 tahun beroperasi dengan daya nominal 30 MWth. 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, kalau ijin operasi dihentikan, maka reaktor RSG-GAS sudah berusia 33 tahun. Kondisi ini perlu diantisipasi dengan melakukan kajian tentang desain reaktor riset baru di Indonesia[1].

Desain teras reaktor riset baru di Indonesia juga mempertimbangkan kondisi reaktor riset dunia saat ini yaitu desain yang diminati saat ini adalah teras reaktor riset jenis MTR dan teras kompak menggunakan bahan bakar UMo densitas tinggi.[2-4]. Disamping itu reaktor riset jenis MTR mempunyai utilisasi tinggi karena dapat digunakan untuk riset dan juga produksi radio isotop. 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 masuk konstruksi maka desain konseptual, desain dasar dan desain detail harus dilakukan terlebih dahulu. Oleh karena itu, beberapa desain reaktor riset baru telah dilakukan saat ini namun belum memenuhi kriteria yang diinginkan yaitu fluks neutron di dalam teras masih lebih kecil dari  $1 \times 10^{15}$  n/cm<sup>2</sup>s, dengan demikian perlu dilakukan redesign teras reaktor riset baru sehingga persyaratan yang telah ditetapkan di dalam UCD dapat dipenuhi. Perhitungan desain teras reaktor baru ini juga harus mempertimbangkan pola manajemen bahan bakar di dalam teras, sehingga memenuhi keselamatan serta optimal dan efisien dalam penggunaan bahan bakar[5].

Makalah ini menyajikan hasil perhitungan desain teras reaktor riset baru dengan berbagai pola manajemen bahan bakar di dalam teras. Berbagai pola tersebut kemudian ditinjau dari aspek neutronik untuk menentukan mana yang paling optimal dan efisien. Hasil perhitungan ini dijadikan salah satu acuan dari desain konseptual yang diberi nama desain reaktor riset inovatif (reaktor RRI). Hasil perhitungan ini merupakan lanjutan dari perhitungan desain konseptual dari aspek neutronik sebelumnya[6] dan merupakan langkah awal untuk mendapatkan desain konseptual secara menyeluruh. Pada penelitian ini dilakukan modifikasi pada tinggi bahan bakar dari 60 cm[6] menjadi 70 cm dan bentuk batang penyerap garpu[6] menjadi persegi. Tujuan dari riset ini mendapatkan nilai parameter neutronik yang memenuhi keselamatan dan kriteria desain dalam UCD, konfigurasi 5x5 dianggap yang paling optimal karena memiliki fluks neutron termal maksimal sekitar  $1,0 \times 10^{15}$  n/cm<sup>2</sup>s pada daya 50 MW, memiliki panjang operasi satu siklus minimal 20 hari dengan bahan bakar baru UMo-Al. Dalam desain konseptual ini dipakai kriteria keselamatan seperti *shutdown margin* dan *one stuck rod criteria* serta reaktivitas di akhir siklus.

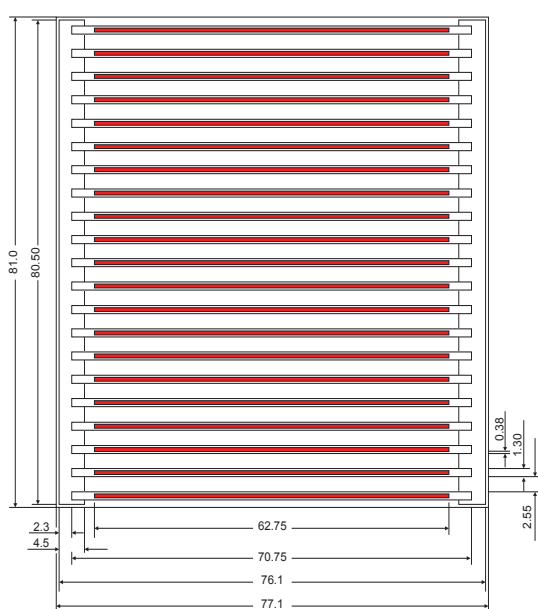
Perhitungan teras dilakukan dengan pola manajemen bahan bakar teras segar (*fresh core*) dan teras setimbang dengan bahan bakar jenis baru UMo-Al. Perhitungan teras diperoleh dengan paket prog metode difusi neutron 2-dimensi dan 3 dimensi, BATAN-FUEL [7]. Sedangkan generasi tampang lintang bahan bakar dengan temperatur yang bervariasi dilakukan dengan paket prog transport neutron WIMSD-5B dengan data nuklir dari ENDF/B-VII.0 [8-9].

## DESAIN NEUTRONIK TERAS RRI

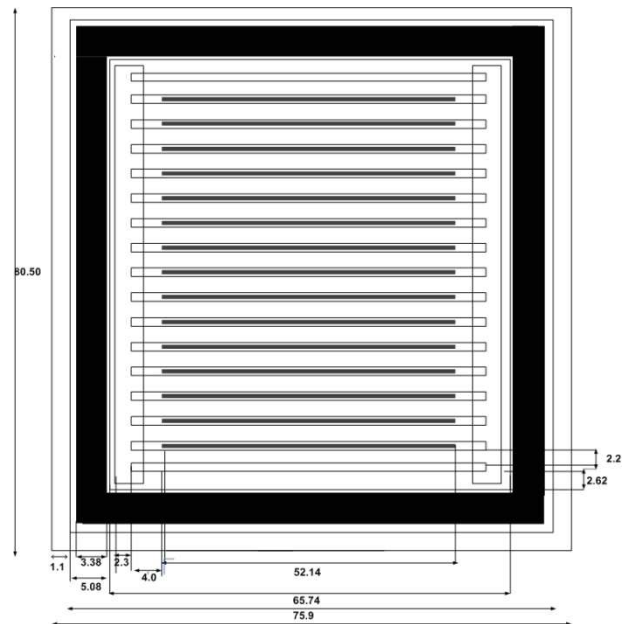
Bahan bakar memegang peranan penting dalam desain suatu reaktor. Berdasarkan UCD (*User Criteria Document*) reaktor RRI menggunakan tipe bahan bakar yang sama dengan reaktor RSG-GAS, yaitu tipe pelat lurus dengan dimensi 8,05 cm × 7,6 cm × 70 cm (teras aktif). Dengan demikian, kisi teras reaktor RRI sama dengan reaktor RSG-GAS yaitu 8,1 cm × 7,71 cm. Untuk pengendalian reaktivitas, batang kendali yang digunakan di reaktor RRI menggunakan tipe persegi (*square type*) dengan material Ag-In-Cd diletakkan di sisi luar 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 dengan penyerap berbentuk persegi, yang digunakan dalam analisis ini

Tabel 1. Data geometri perangkat bahan bakar reaktor RRI [6]

Dimensi kisi teras untuk elemen bakar standar (EB) dan kendali (EK), cm	7,71 × 81 × 70,
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 × 70
Material bahan bakar	U9Mo-Al
Muatan massa <sup>235</sup> U, g	360, 390, 450
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

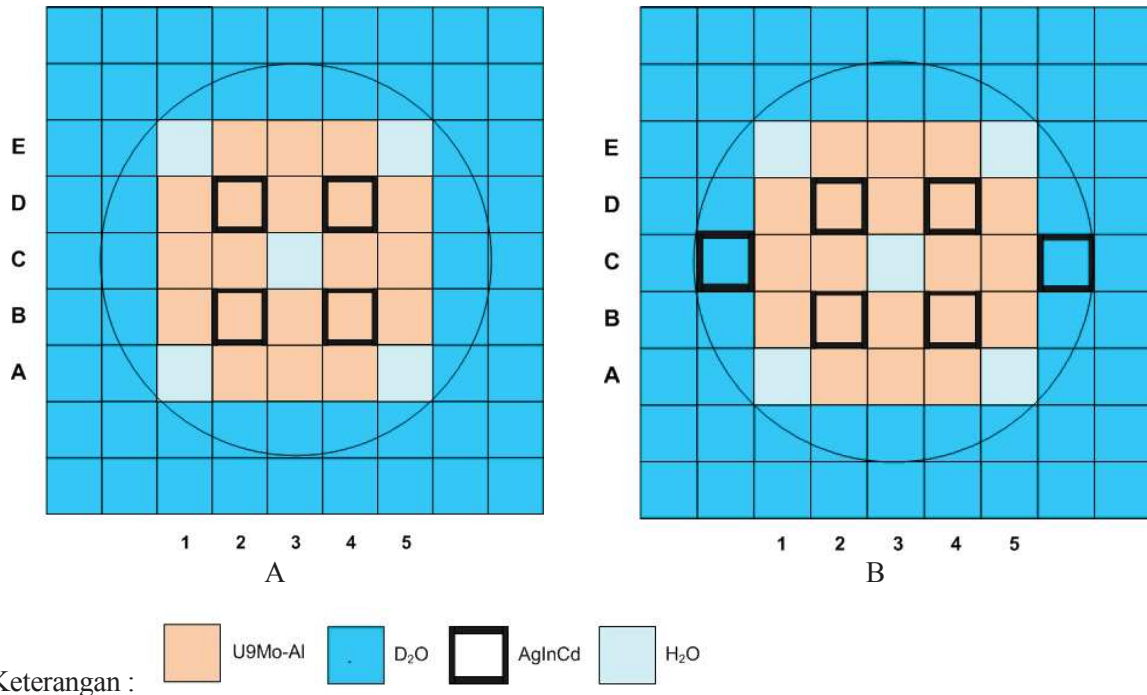


Gambar 2. Elemen bakar kendali reaktor RRI

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 (<sup>235</sup>U) dalam desain dipilih lebih tinggi dari yang dipakai di reaktor RSG-GAS yaitu:

1. 360 g <sup>235</sup>U atau kerapatan uranium dalam *meat* sebesar 3,66 g/cm<sup>3</sup>
2. 390 g <sup>235</sup>U atau kerapatan uranium dalam *meat* sebesar 3,98 g/cm<sup>3</sup>
3. 450 g <sup>235</sup>U atau kerapatan uranium dalam *meat* sebesar 4,57 g/cm<sup>3</sup>

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 tetapi tidak memiliki pelat bahan bakar melainkan pelat *dummy* aluminium dengan dimensi penyerap yang lebih kecil dari batang kendali di teras dan diletakkan di luar teras.



Gambar 3. Teras RRI konfigurasi 5 x 5

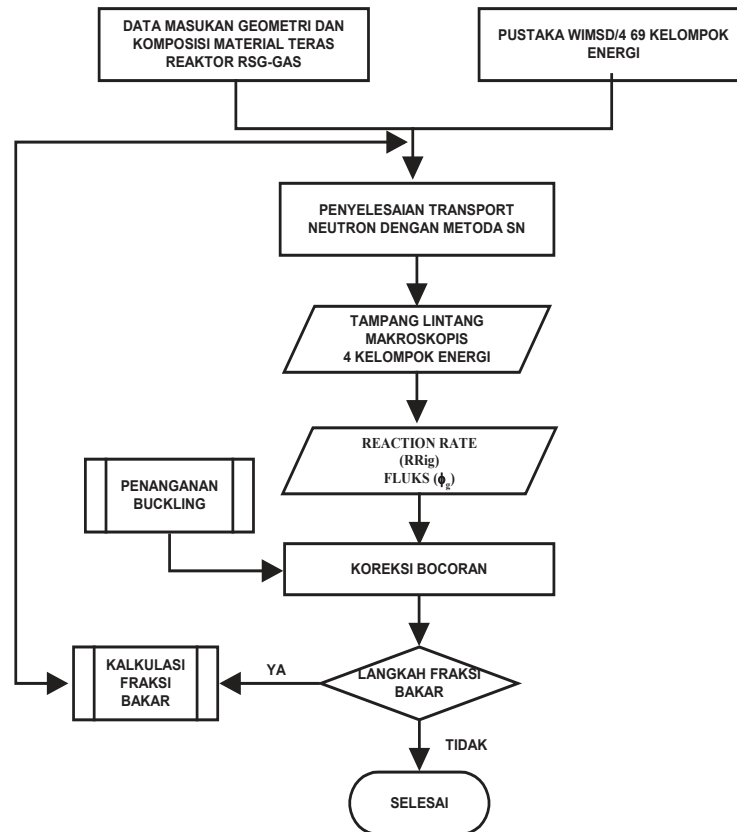
Berdasarkan kajian sebelumnya telah diperoleh bahwa parameter neutronik teras RRI seperti pada Gambar 3 yang paling optimum[6]. Konfigurasi teras kompak adalah 5x5 mempunyai 16 elemen bakar dan 4 elemen kendali. Penambahan 2 batang kendali pengaman (BKP) diterapkan pada perhitungan teras kompak dengan tingkat muat 450 g. Berdasarkan kondisi dan konfigurasi teras tersebut maka dilakukan perhitungan parameter teras dengan pola manajemen bahan bakar teras yang berbeda. Hasil yang diharapkan adalah memenuhi kriteria keselamatan dan nilai fluks neutron termal maksimal di teras melebihi  $1,0 \times 10^{15}$  n/cm<sup>2</sup>s.

## METODOLOGI

Dalam mendesain suatu teras Desain neutronik teras setimbang membutuhkan beberapa langkah perhitungan yaitu:

### Perhitungan Sel

Dalam penelitian ini perhitungan sel dilakukan dengan paket program WIMSD-5B untuk membangkitkan seluruh konstanta difusi seluruh material teras dalam 4 (empat) kelompok tenaga neutron. Batas kelompok tenaga neutronnya adalah 10 MeV, 0,821 MeV, 5,531 keV, 0,625 eV dan  $1 \times 10^{-5}$  eV. Khusus untuk bahan bakar, pembangkitan konstanta kelompok yang dibangkitkan sebagai fungsi massa <sup>235</sup>U dalam perangkat (360 g, 390 g dan 450 g), dalam kondisi panas xenon setimbang, dingin xenon setimbang bebas samarium, dingin bebas xenon dan samarium, dingin bebas xenon. Data tampang lintang makroskopis seperti sigma fisi, konstanta difusi untuk tiap inti dapat belah yang memberikan kontribusi dalam perhitungan parameter neutronik diperoleh dari perhitungan sel yang dilakukan dengan paket program WIMSD-5B dengan diagram alir program seperti ditunjukkan pada Gambar 4.

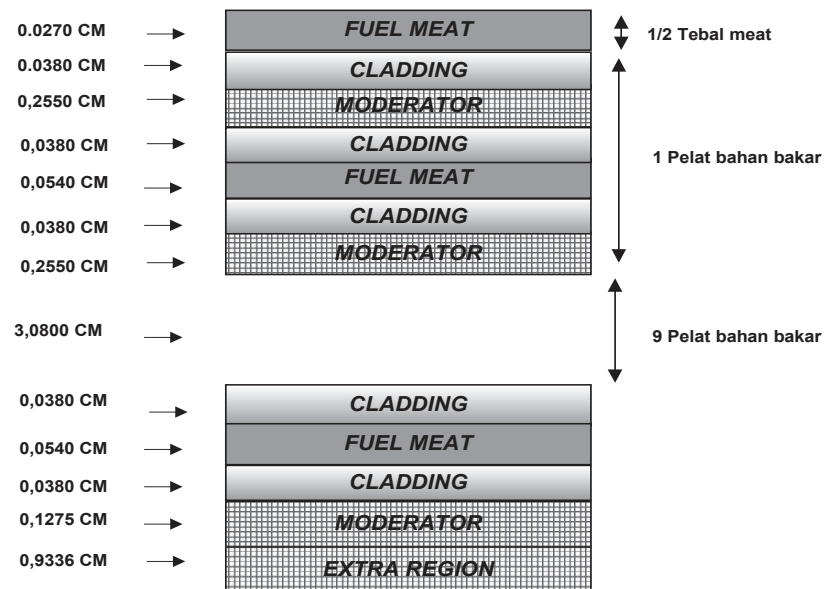


Gambar 4. Diagram alir program WIMSD-5B[8 ]

Program WIMSD-5B hanya mampu melakukan perhitungan transport neutron satu dimensi[8]. Oleh karena itu daerah aktif elemen bakar dan elemen kendali (Gambar 1 dan 2) perlu dimodelkan dalam satu dimensi yang merupakan susunan beberapa *slab*. Sel pada pemodelan ini adalah satu elemen bakar yang terdiri dari 21 plat elemen bakar dinyatakan dalam 1/2 bahan bakar, yang jika disusun dalam *slab* terdiri atas 44 *slab* material. Ada 4 material yang menyusun sel bahan bakar teras reaktor RRI yaitu:

- (1). Material/daerah *meat* yang mempunyai ketebalan 0,027 cm.
- (2). Material/daerah kelongsong yang mempunyai ketebalan 0,038 cm.
- (3). Material/daerah *moderator* (H<sub>2</sub>O) yang mempunyai ketebalan 0,255 cm.
- (4). Material/ daerah *extra region* .

Daerah yang tidak termasuk ke-3 daerah tersebut dikumpulkan dalam satu daerah yang disebut *extra region*. Daerah *extra region* merupakan campuran AlMg<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O. Model sel bahan bakar teras reaktor RRI dinyatakan dalam Gambar 5 dan sebagai masukan (*input*) paket prog WIMSD-5B.



Gambar 5. Model sel elemen bakar teras RRI

Konstantaampang lintang makroskopik dihitung oleh paket program WIMSD-5B dalam 4 kelompok energi neutron, batas-batas energi neutron setiap kelompok yang dipilih adalah 10 MeV, 0,821 MeV, 5,531 keV, 0,625 eV dan  $1 \times 10^{-5}$  eV. Khusus untuk bahan bakar pembangkitan konstanta kelompok yang dibangkitkan sebagai fungsi massa  $^{235}\text{U}$  dalam perangkat (360 g, 390 g dan 450 g), temperatur (dingin dan panas) dan kondisi Xe (tanpa (*free*) dan setimbang). Konstanta kelompok difusi neutron sebagai fungsi temperatur dan densitas yang sesuai dengan fraksi bakar teras diperoleh dengan cara interpolasi. Dengan menggunakan konstantaampang lintang yang telah diinterpolasi dilakukan perhitungan teras dengan fraksi bahan bakar tertentu.

### Penyusunan Konfigurasi Teras.

Konfigurasi teras yang dipilih adalah  $5 \times 5$  (25 kisi teras). Seperti disinggung sebelumnya teras didesain kompak sehingga teras tidak terlalu lebar. Konfigurasi disusun dengan menjaga kelas fraksi bakar simetris untuk teras setimbang. Dengan demikian fasilitas untuk posisi iradiasi dan batang kendali pengaman disusun sedemikian agar simetris teras tetap dijaga.

### Perhitungan Teras.

Perhitungan teras dilakukan untuk mengetahui nilai parameter neutronik teras 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 50 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* dan reaktivitas teras di akhir siklus terpenuhi. Yang dimaksud dengan *stuck rod* adalah jika sebuah batang kendali yang memiliki nilai reaktivitas terbesar gagal masuk ke dalam 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 dengan reflektor  $\text{D}_2\text{O}$ .

Asumsi yang dipakai dalam penelitian ini adalah:

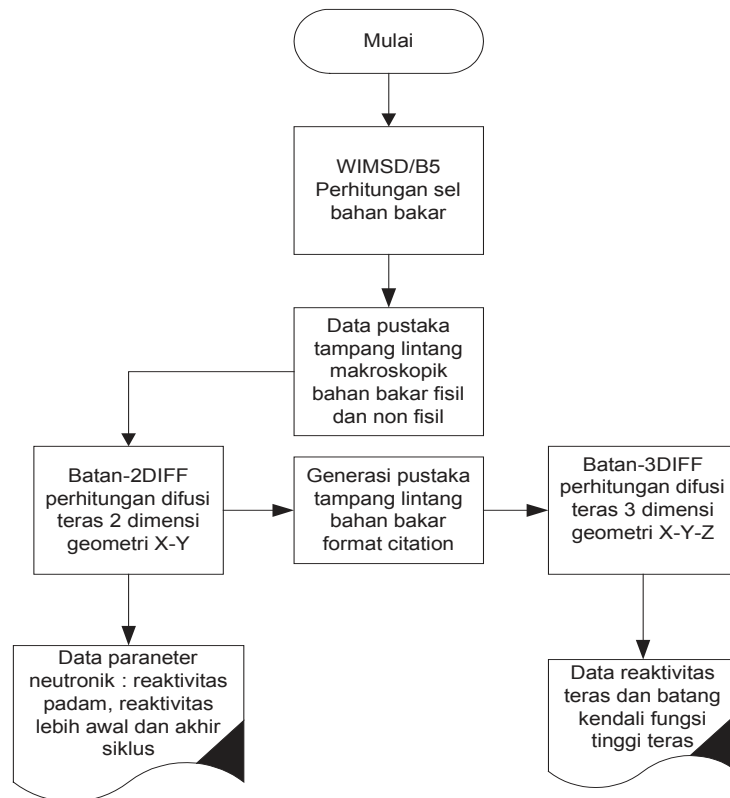
- *core shroud* tidak digunakan. Oleh karena itu reflektor bersinggungan langsung dengan daerah teras.
- pendingin teras menggunakan  $\text{H}_2\text{O}$ .



- saat kondisi panas (*full power*), seluruh material yang non bahan bakar dalam kondisi temperatur kamar.

Gambar 6 menunjukkan diagram alir perhitungan teras RRI menggunakan Batan-FUEL. Konfigurasi teras segar dan teras setimbang dapat diterima jika memenuhi kriteria keselamatan yaitu [10]:

1. margin padam minimum saat *stuck rod* adalah  $0,5 \% \Delta k/k$ .
2. nilai FPD maksimum adalah 1,4.
3. reaktivitas teras di akhir siklus xenon setimbang  $> 1 \% \Delta k/k$



Gambar 6. Diagram alir perhitungan teras RRI

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Teras Segar Reaktor RRI

Perhitungan teras segar (sekali buang) menggunakan Batan-2DIFF yang dilakukan pada konfigurasi teras  $5 \times 5$  dengan penyerap berbentuk persegi seperti yang disajikan pada Gambar 3 menghasilkan nilai parameter neutronik seperti yang disajikan pada Tabel 3. Konfigurasi teras  $5 \times 5$ , terdiri dari 16 elemen bakar standar (EB) dan 4 elemen bakar kendali (EK) serta 5 posisi iradiasi dalam teras, yaitu satu di tengah teras dan 4 posisi di teras luar. Tampak di Gambar 3 bahwa untuk jenis reflektor  $D_2O$ , diperlukan tambahan 2 (dua) batang kendali pengaman (*safety rod*), SR1 dan SR2 untuk muatan diatas 450 g namun untuk teras dengan muatan 360 g dan 390 g tidak memerlukan batang kendali pengaman (BKP).

Jika margin padam minimum kurang dari  $0,5 \% \Delta k/k$ . atau reaktivitas padam bernilai positif (+), maka data hasil perhitungan teras tidak memenuhi syarat keselamatan. Tabel 3 menunjukkan bahwa dari aspek keselamatan reaktivitas, pengendalian reaktivitas pada teras segar ini dapat diterima. karena tidak ada yang melanggar batas keselamatan dimana kondisi *stuck rod*  $> -0,5 \% \Delta k/k$  dan FPD  $< 1,4$  serta fluks neutron sudah memenuhi yaitu lebih besar dari  $1,0 \times 10^{15}$  n/cm<sup>2</sup>s. Hal yang perlu diperhatikan adalah reaktivitas teras kondisi *stuck rod* untuk teras segar 390 g adalah  $-0,51 \% \Delta k/k$ ,

yang berarti margin padam hanya 0,01 % $\Delta$ k/k, sangat mendekati dengan syarat batas, sehingga teras dengan tingkat muat 390 g sebaiknya ditambah BKP seperti halnya pada teras 450 g. Meski teras segar 450 g telah ditambah dengan BKP, namun margin padam yang dihasilkan masih kecil yaitu 0,53 % $\Delta$ k/k meski panjang siklus dapat mencapai 38 hari. Jika ditinjau dari segi fluks neutron termal yang paling baik untuk teras segar ini, baik di pusat teras maupun pada posisi iradiasi di teras luar adalah teras dengan muatan 360 g dengan pola manajemen bahan bakar sekali buang.

Tabel 3. Parameter neutronik konfigurasi teras segar RRI 5 x 5

No.	Parameter	Tingkat muat		
		360 g	390 g	450 g
1.	Daya (MW)	50	50	50
2	Panjang siklus (hari)	22	28	38
3.	Reaktivitas satu siklus (% $\Delta$ k/k)	6,78	7,82	9,01
4.	Reaktivitas xenon (% $\Delta$ k/k)	3,93	3,93	3,94
5.	Reaktivitas samarium (% $\Delta$ k/k)	0,00	0,00	0,00
6.	Reaktivitas <i>hot to cold</i> (% $\Delta$ k/k)	0,40	0,39	0,37
7.	Reaktivitas lebih (% $\Delta$ k/k)	12,26	13,20	14,51
8.	Margin padam minimum (% $\Delta$ k/k)	1,41	0,01	0,53
9.	Reaktivitas batang kendali total (% $\Delta$ k/k)	-25,64	-24,68	-27,43
10.	Reaktivitas padam (% $\Delta$ k/k)	-13,38	-11,49	-12,93
11.	<i>One stuck rod</i> (% $\Delta$ k/k)	-1,91	-0,51	-1,03
12.	Fraksi bakar maksimum (%)	24,50	28,83	33,50
13	FPD radial maksimum	1,19	1,19	1,19
14	Kerapatan daya rerata di teras (W/cm <sup>3</sup> )	635	635	635
<b>Fluks neutron pada posisi iradiasi x10<sup>15</sup> (n/cm<sup>2</sup>s)</b>				
15	Fluks neutron cepat	0,180	0,123	0,122
16	Fluks neutron epitermal	0,430	0,299	0,294
17	Fluk neutron termal	0,816	0,586	0,558
<b>Fluks neutron pada pusat teras x10<sup>15</sup> (n/cm<sup>2</sup>s)</b>				
18	Fluks neutron cepat	0,362	0,263	0,273
19	Fluks neutron epitermal	0,713	0,537	0,543
20	Fluks neutron termal	1,077	1,052	1,039

### Teras Setimbang Reaktor RRI

Tabel 4 menyajikan susunan 2 kelas fraksi bakar dalam teras setimbang, kelas 1 adalah bahan bakar segar dan kelas 2 adalah bahan bakar yang telah menjalani satu siklus operasi reaktor. Tanda negatif (-) menunjukkan posisi elemen bakar kendali. Dari Tabel 5 ditunjukkan bahwa dari aspek pengendalian reaktivitas, teras setimbang dengan dua kelas fraksi bakar memenuhi kriteria keselamatan yaitu kondisi reaktivitas *stuck rod* > - 0,5 % $\Delta$ k/k dan nilai PPF < 1,4, serta fluks neutron maksimum di pusat teras sudah memenuhi kriteria UCD yang ditetapkan yaitu > 1,0 x 10<sup>15</sup> n/cm<sup>2</sup>s. Namun dari segi panjang siklus hanya muatan yang 450 g yang memenuhi syarat UCD yaitu minimal 20 hari dengan panjang siklus 21 hari dengan fraksi bakar maksimum akhir siklus 44,2 % dengan margin padam yang cukup yaitu 2,93 % $\Delta$ k/k.

Tabel 4. Susunan fraksi bakar teras setimbang 5 x 5

IP	1	2	1	IP
2	-2	1	-2	2
1	2	IP	2	1
2	-1	1	-2	2
IP	1	2	1	IP



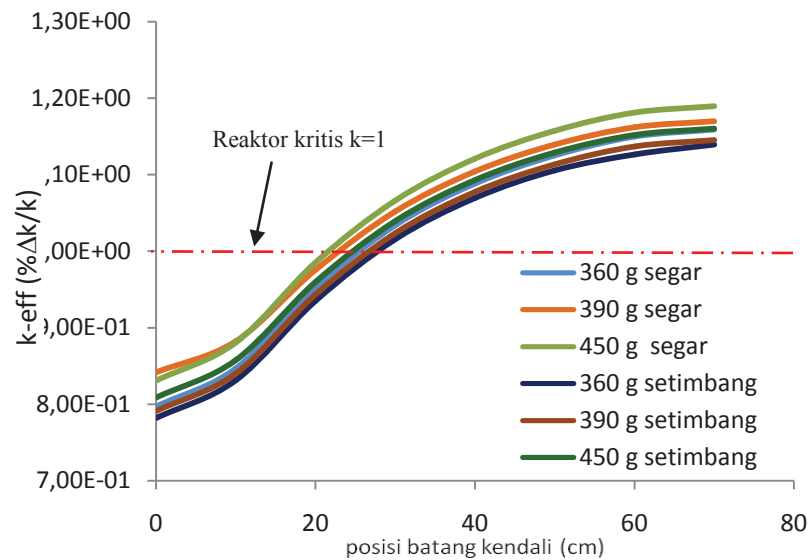
Tabel 5. Parameter neutronik konfigurasi teras setimbang RRI 5 × 5

No.	Parameter	Tingkat muat		
		360 g	390 g	450 g
1.	Daya (MW)	50	50	50
2	Panjang siklus (hari)	11	15	21
3.	Reaktivitas satu siklus (% $\Delta k/k$ )	4,58	5,41	6,25
4.	Reaktivitas xenon (% $\Delta k/k$ )	3,94	3,95	3,96
5.	Reaktivitas samarium (% $\Delta k/k$ )	0,31	0,32	0,34
6.	Reaktivitas <i>hot to cold</i> (% $\Delta k/k$ )	0,43	0,42	0,40
7.	Reaktivitas lebih (% $\Delta k/k$ )	10,72	11,32	12,33
8.	Margin padam minimum (% $\Delta k/k$ )	3,13	2,09	2,93
9.	Reaktivitas batang kendali total (% $\Delta k/k$ )	-26,41	-25,60	-28,50
10.	Reaktivitas padam (% $\Delta k/k$ )	-15,69	-14,28	-16,17
11.	<i>One stuck rod</i> (% $\Delta k/k$ )	-3,63	-2,59	-3,43
12.	Fraksi bakar maksimum (%)	29,91	37,05	44,42
13	FPD radial maksimum	1,22	1,22	1,24
14	Kerapatan daya rerata di teras (W/cm <sup>3</sup> )	635	635	635
<b>Fluks neutron pada posisi iradiasi x10<sup>15</sup> (n/cm<sup>2</sup>s)</b>				
15	Fluks neutron cepat	0,127	0,126	0,125
16	Fluks neutron epitermal	0,308	0,306	0,302
17	Fluk neutron termal	0,605	0,579	0,553
<b>Fluks neutron pada pusat teras x10<sup>15</sup> (n/cm<sup>2</sup>s)</b>				
18	Fluks neutron cepat	0,271	0,269	0,260
19	Fluks neutron epitermal	0,554	0,549	0,540
20	Fluks neutron termal	1,101	1,081	1,072

Dari aspek operasi reaktor, tampak dalam Tabel 3 dan Tabel 5 bahwa panjang siklus yang terbesar terjadi di teras dengan muatan 450 g baik dengan teras segar maupun teras setimbang. Hal ini berkaitan reaktivitas lebih yang dimiliki teras dengan berefektor D<sub>2</sub>O ini yang paling besar adalah pada teras 450 g. Panjang siklus operasi dan reaktivitas lebih teras akan semakin besar nilainya jika tingkat muat <sup>235</sup>U dalam elemen bakar semakin besar. Dari segi reaktivitas, penambahan dua buah BKP dapat menambah margin padam reaktor sehingga nilai reaktivitas kondisi *stuck rod* menjadi lebih besar dari syarat batas dan lebih meyakinkan bahwa reaktor dalam kondisi subkritis.

Dari aspek kerataan pembangkitan panas yang ditunjukkan dengan nilai FPD radial maksimum, terlihat jelas dari Tabel 3 dan Tabel 5. Nilai FPD pada teras segar hampir sama antara tingkat muat 360 g, 390 g dan 450 g. Pada teras setimbang, FPD untuk tingkat muat 450 g mempunyai nilai tertinggi. Hal ini selain disebabkan oleh tingkat muat yang tinggi juga karena pada awal siklus fraksi bakar di teras bervariasi terbagi dalam 2 kelas yang berarti sangat dipengaruhi oleh jenis pola manajemen bahan bakar. Perubahan nilai FPD akibat pola manajemen bahan terjadi pada perubahan bakar pada tingkat muat <sup>235</sup>U tertentu sehingga dapat dikatakan bahwa FPD dipengaruhi oleh manajemen bahan bakar. Oleh karena itu faktor utama dalam penentuan nilai FPD maksimum adalah distribusi fraksi bakar EB dan EK disekitar posisi iradiasi (IP). Nilai FPD yang paling besar adalah 1,24 dengan fraksi terbesar dan dekat EK pada teras setimbang. Nilai FPD radial maksimum untuk seluruh jenis teras dan tingkat muat <sup>235</sup>U lebih kecil dari pada nilai kriteria keselamatan 1,4.

Dari segi kritikalitas, Gambar 7 menunjukkan nilai reaktivitas teras berdasarkan ketinggian batang kendali bank yang merupakan hasil perhitungan kritikalitas dengan Batan-3DIFF pada teras aktif 70 cm. Posisi kritis batang kendali dimana k=1 yang ditunjukkan dengan sumbu y terlihat bahwa posisi bank pada teras segar lebih rendah dari teras setimbang, dikarenakan massa bahan bakar di teras teras setimbang lebih kecil dibanding teras segar, dikarenakan sudah terjadi pembakaran bahan bakar di teras.



Gambar 7. Karakteristik reaktivitas teras pada kondisi kritis.

Dari segi konsumsi bahan bakar, teras setimbang dengan tingkat muat 450 g merupakan teras paling ekonomis dibanding dengan teras segar 360 g. Pada teras segar terjadi pergantian 16 elemen bakar dan 4 elemen bakar setiap siklusnya, sedangkan pada teras setimbang 450 g pergantian bahan bakar sebanyak 8 elemen bakar 2 elemen kendali setiap siklusnya.

## KESIMPULAN

Penelitian ini menggunakan konfigurasi teras reaktor riset inovatif (RRI) baru tipe MTR berdaya termal 50 MW yang memenuhi syarat keselamatan dengan menggunakan bahan bakar U-9Mo-Al tingkat muat  $^{235}\text{U}$  minimum 360 g, 390 g, 450 g dan panjang siklus minimum 20 hari (1000 MWD) untuk 2 jenis pola manajemen bahan bakar. Berdasarkan hasil optimasi yang fokus utamanya dari kemampuan maksimum utilisasi, maka konfigurasi teras setimbang dengan  $5 \times 5$  dengan tingkat muat  $^{235}\text{U}$  sebesar 450 g dengan reflektor  $\text{D}_2\text{O}$  adalah teras setimbang yang optimal. Disamping fluks neutron termal maksimum di daerah pusat sebesar  $1,072 \times 10^{15} \text{ ncm}^{-2}\text{s}^{-1}$ , margin padam minimum -3,43 % $\Delta k/k$  (*stuck rod*) dan panjang siklus 20 hari. Untuk teras segar teras 360 juga memenuhi keselamatan dan kriteria penerimaan UCD namun dari segi manajemen bahan bakar kurang menguntungkan.

## DAFTAR PUSTAKA

1. 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
2. Seo, C.G., Cho, N.Z. A core design concept for multi-purpose research reactor. Nucl. Eng. Des. 2012; 252: 34 – 41.
3. Raina, V.K., Sasidhaoran, K., Sengupta, S., Singh, T. Multi purpose research reactor. Nucl. Eng. Des. 2006; 236: 770–783
4. Teruel, F.E, Rizwan-uddin. An innovative research reactor design. Nucl. Eng. Des. 2009; 239: 395-407.
5. Lily Suparlina. Kajian desain konfigurasi teras reaktor riset untuk persiapan rancangan reaktor riset baru di Indonesia. Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir; 2012: 193 – 201.

6. Tukiran S, Surian Pinem, Tagor MS, Lily S, Jati Susilo. Desain konseptual teras reaktor riset inovatif berbahan bakar uranium-molibdenum dari aspek neutronik. Jurnal TDM. Oktober. 2012 ;14; 3: 178 – 191
7. Liem, P.H. Batan-FUEL: A general in-core fuel management code. Atom Indonesia. 1996; 22 (2): 67 – 80.
8. WIMS-D5. OECD/NEA Data Bank Documentation, Package ID No.1507/02; 1998
9. IAEA. WIMS-D Library Update. IAEA, Vienna; 2007.
10. BATAN. Laporan Analisis Keselamatan Rev. 10. BATAN; 2010.