

EFEK DENSITAS BAHAN BAKAR TERHADAP PARAMETER KOEFISIEN REAKTIVITAS TERAS RRI

Rokhmadi, Tukiran S
Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir, PTRKN-BATAN
Kawasan PUSPIPTEK Gd. No. 80 Serpong Tangerang Selatan 15310
Email: rokhmadi@batan.go.id

Diterima editor 26 Maret 2013
Disetujui untuk publikasi 25 April 2013

ABSTRAK

EFEK DENSITAS BAHAN BAKAR TERHADAP PARAMETER KOEFISIEN REAKTIVITAS TERAS RRI. Manfaat yang luas penggunaan reaktor riset membuat banyak negara membangun reaktor riset baru. Kecenderungan saat ini adalah tipe reaktor serbaguna (MPR) dengan teras yang kompak untuk mendapatkan fluks neutron yang tinggi dengan daya yang relatif rendah. Reaktor riset yang ada di Indonesia usianya sudah tua semuanya. 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 untuk melengkapi data desain RRI sebagai salah satu persyaratan untuk perizinan desain. Perhitungan dilakukan untuk memperoleh nilai koefisien reaktivitas teras RRI dengan konfigurasi teras setimbang yang optimal dengan konfigurasi teras 5×5 dan daya 20 MW, memiliki panjang operasi satu siklus lebih dari 40 hari. Perhitungan koefisien reaktivitas teras RRI dilakukan untuk bahan bakar baru U-9Mo-Al dengan kerapatan bervariasi. Perhitungan dilakukan dengan paket program WIMSD-5B dan BATAN-FUEL. Hasil perhitungan digunakan untuk melengkapi data desain konseptual teras yang menunjukkan bahwa teras setimbang reaktor RRI dengan konfigurasi 5×5, tingkat muat ²³⁵U sebesar 450 g, 550 g dan 700 g memiliki nilai koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar, temperatur moderator, densitas moderator dan void semuanya negatif dan nilainya sangat bervariasi. Hal ini sudah memenuhi kriteria keselamatan desain konseptual teras RRI.

Kata kunci: desain konseptual, bahan bakar uranium-molibdenum, koefisien reaktivitas, WIMS, BATAN-FUEL

ABSTRACT

FUEL DENSITY EFFECT ON PARAMETER OF REACTIVITY COEFFICIENT OF THE RRI CORE. The multipurpose of research reactor utilization make many countries build the new reserach 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 reactor in Indonesia right now is already 25 year old. Therefor, it is needed to design a new research reactor as a alternative called it innovative research reactor (IRR) and then as an exchanger for old research reactor. The aim of this research is to complete RRI core design data as a requirement for design linsince. Calculation done is to get the RRI core reactivity coefficients with 5 x5 core configuration and 20 MW of power, has more than 40 days cycle of lenght. The RRI core reactivity coefficient calculation is done for new U-9Mo-Al fuel with variation of densities. The calculation is done by using WIMSD-5B and BATAN-FUEL computer codes. The result of calculation for conceptual design showed that the equilibrium RRI core with 5x5 configuration, 450 g, 550 g and 700 g of fuel loadings have negative reactivity coefficients of fuel temperature, moderator temperature, void fraction and density of moderator but the values of the reactivities are very variative. This results has met the safety criteria for RRI core conceptual design.

Keywords: conceptual design, uarium-molibdenum-uarium feul, reactivity coefficient, WIMS, BATAN-FUEL

PENDAHULUAN

Penggunaan reaktor riset yang semakin luas 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 tipe pelat lurus (MTR, *Material Testing Reactor*). Daya termal yang bervariasi, serta jenis reflektor yang beragam, berilium, grafit, H₂O dan D₂O, digunakan dalam reaktor riset tersebut [2].

Indonesia saat ini memiliki 3 reaktor riset yang usianya sudah tua, paling muda adalah reaktor RSG-GAS, dengan daya nominal 30 MWth, yaitu 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, kalau izin operasi dihentikan, maka reaktor RSG-GAS sudah berusia 33 tahun. Kondisi 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 saat ini yaitu 70 % reaktor yang beroperasi saat ini telah berumur lebih 30 tahun dan lebih dari 50 % telah beroperasi lebih dari 40 tahun [3]. 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, 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 *user* 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 U9Mo-Al [4].

Bahan bakar U9Mo-Al merupakan jenis baru yang saat ini masih diteliti penggunaannya, namun dalam hal fabrikasinya sudah tidak diragukan lagi. Bahan bakar U9Mo-Al dapat dimuat dengan densitas lebih tinggi dibanding bahan bakar uranium silisida yang hanya dapat dimuat 4,8 gU/cm³, sedangkan bahan bakar U9Mo-Al jenis serbuk dapat dikemas hingga densitas 8,5 gU/cm³[5].

Makalah ini menyajikan hasil perhitungan koefisien reaktivitas teras RRI terpilih untuk 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 dengan konfigurasi teras yang kompak sehingga lebih ekonomis serta bahan bakar yang digunakan dapat diproduksi juga secara mandiri. Hasil perhitungan ini merupakan lanjutan dari perhitungan desain konseptual dari aspek neutronik dan merupakan langkah awal untuk mendapatkan desain konseptual secara menyeluruh. Tujuan dari riset ini mendapatkan nilai parameter koefisien reaktivitas teras dengan konfigurasi 5×5 yang dianggap yang paling optimal karena memiliki fluks neutron termal minimum sebesar $2,5 \times 10^{14}$ n/cm² s pada daya 20 MW, memiliki panjang operasi satu siklus lebih dari 40 hari dengan bahan bakar baru U9Mo-Al. Dalam desain konseptual ini dipakai kriteria keselamatan untuk koefisien reaktivitas adalah semua nilai koefisien reaktivitas harus bernilai negatif.

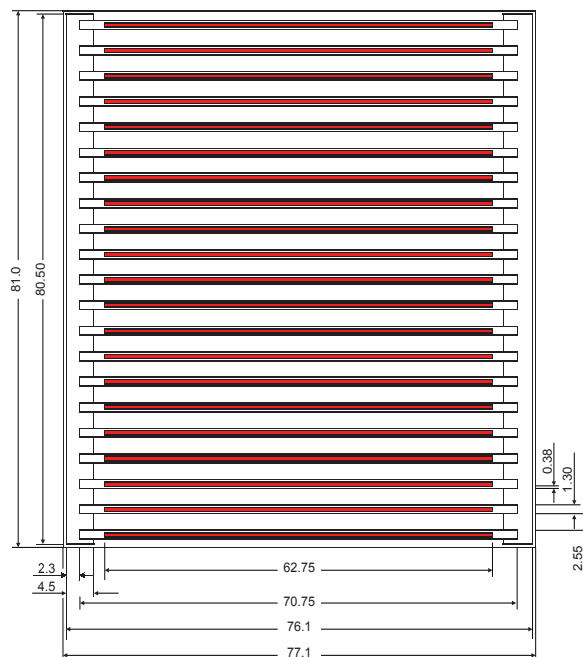
Perhitungan teras dilakukan dengan mencari teras setimbang dengan bahan bakar jenis baru U9Mo-Al. Teras setimbang diperoleh dengan paket program metode difusi neutron 2-dimensi, BATAN-FUEL [6]. Sedangkan generasi tampang lintang bahan bakar dengan temperatur yang bervariasi dilakukan dengan paket program transport neutron WIMSD-5B [7] dengan data nuklir dari ENDF/B-VII.0 [8].

DESAIN NEUTRONIK TERAS RRI

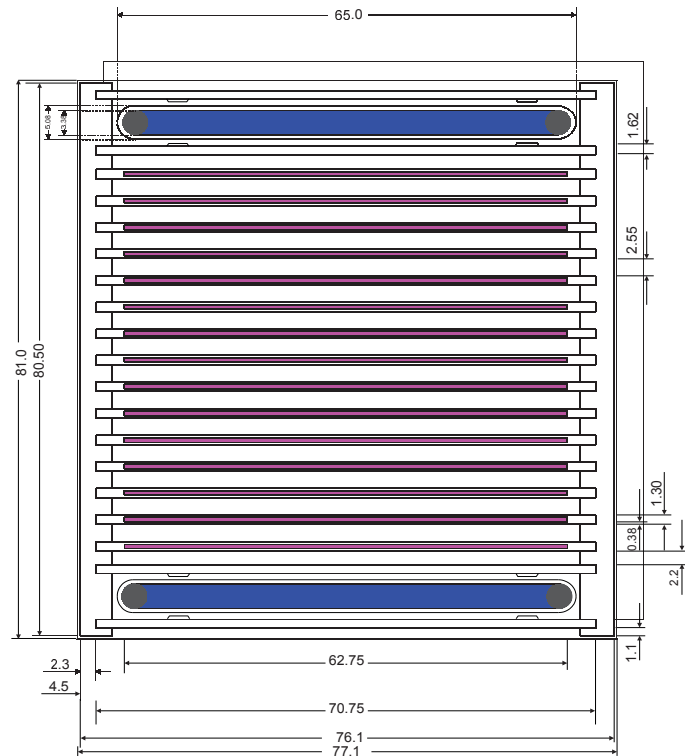
Bahan bakar memegang peranan penting dalam desain suatu reaktor. Berdasarkan UCD (*User Criteria Document*) reaktor RRI menggunakan tipe bahan bakar yang sama dengan reaktor RSG-GAS, yaitu tipe pelat lurus dengan dimensi 8,05 cm × 7,6 cm × 60 cm (tinggi aktif)[9]. Dengan demikian, kisi teras reaktor 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 dan kendali masing-masing 21 pelat dan 15 pelat. Tabel 1 menyajikan data geometri elemen bakar dan elemen kendali yang dipakai di reaktor RRI. Gambar 1 dan 2 masing-masing menunjukkan elemen bakar dan elemen kendali yang dipakai di reaktor RRI yang diadopsi dari reaktor RSG-GAS.

Tabel 1. Data geometri perangkat bahan bakar reaktor RRI [10]

Dimensi kisi teras untuk elemen bakar standar dan kendali, cm	7,71 × 81 × 60,
Ketebalan pelat bahan bakar, cm	0,13
Lebar kanal pendingin, cm	0,255
Jumlah pelat bahan bakar di elemen bakar	21
Jumlah pelat bahan bakar di elemen kendali	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 masa 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 reaktor RRI [10]

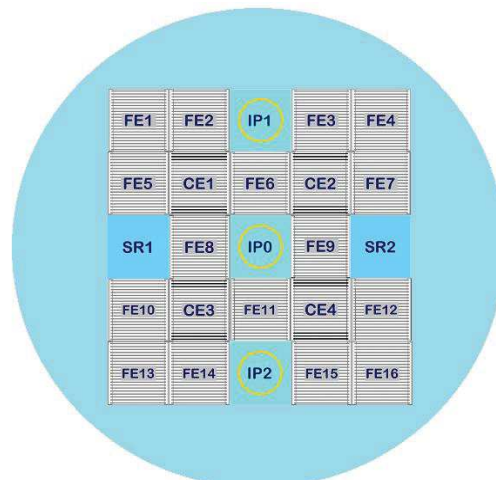


Gambar 2. Elemen kendali reaktor RRI [10]

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 bahan bakar dengan tingkat muat yang tinggi 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

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 tetapi pelat *dummy* aluminium. Batang kendali pengaman diletakkan di teras.



Gambar 3. Teras RRI konfigurasi 5 × 5 [10]

Berdasarkan kajian sebelumnya telah diperoleh bahwa parameter neutronik teras RRI seperti pada Tabel 2 yang paling optimum. Konfigurasi teras adalah 5×5 seperti Gambar 3 dengan 16 elemen bakar dan 4 elemen kendali serta 2 batang kendali pengaman. Berdasarkan kondisi dan parameter neutronik tersebut maka dilakukan perhitungan koefisien reaktivitas teras seperti koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar, moderator, fraksi volum void dan densitas bahan bakar. Hasil yang diharapkan adalah seluruh nilai koefisien reaktivitas negatif sehingga memenuhi kriteria keselamatan desain suatu teras reaktor riset.

Tabel 2. Parameter neutronik konfigurasi teras setimbang RRI 5×5 [10]

1.	Daya (MW)	20	20	20
2.	Reaktivitas satu siklus (% $\Delta k/k$)	3,78	4,58	5,42
3.	Reaktivitas xenon (% $\Delta k/k$)	3,53	3,46	3,33
5.	Reaktivitas samarium (% $\Delta k/k$)	0,59	0,63	0,66
6.	Reaktivitas <i>hot to cold</i> (% $\Delta k/k$)	0,42	0,40	0,39
7.	Reaktivitas lebih (% $\Delta k/k$)	10,06	10,55	11,30
8.	Margin padam minimum (% $\Delta k/k$)	-5,32	-4,09	-2,37
9.	Reaktivitas batang kendali total (% $\Delta k/k$)	-21,43	-20,08	-18,48
10.	Reaktivitas padam (% $\Delta k/k$)	-10,37	-9,53	-7,18
11.	Panjang siklus (hari)	40	50	75
12.	Fraksi bakar maksimum (%)	46	49	57
13.	PPF radial maksimum	1,18	1,19	1,17
14.	Kerapatan daya rerata di teras (W/cm ³)	309	309	309

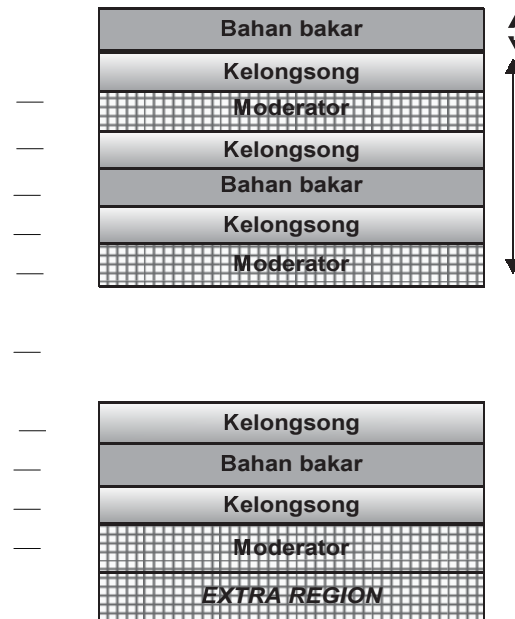
METODOLOGI

Perhitungan Sel

Data tampang lintang makroskopis seperti sigma fisi, konstanta difusi untuk tiap inti dapat belah yang memberikan kontribusi dalam perhitungan koefisien reaktivitas diperoleh dari perhitungan sel yang dilakukan dengan paket program WIMSD-5B dengan diagram alir program seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Program WIMSD-5B hanya mampu melakukan perhitungan transport neutron satu dimensi [9]. 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 $\frac{1}{2}$ 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 (H₂O) 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 AlMg₂ dan H₂O. Model sel bahan bakar teras reaktor RRI dinyatakan dalam Gambar 4 dan sebagai masukan (*input*) paket program WIMSD-5B.

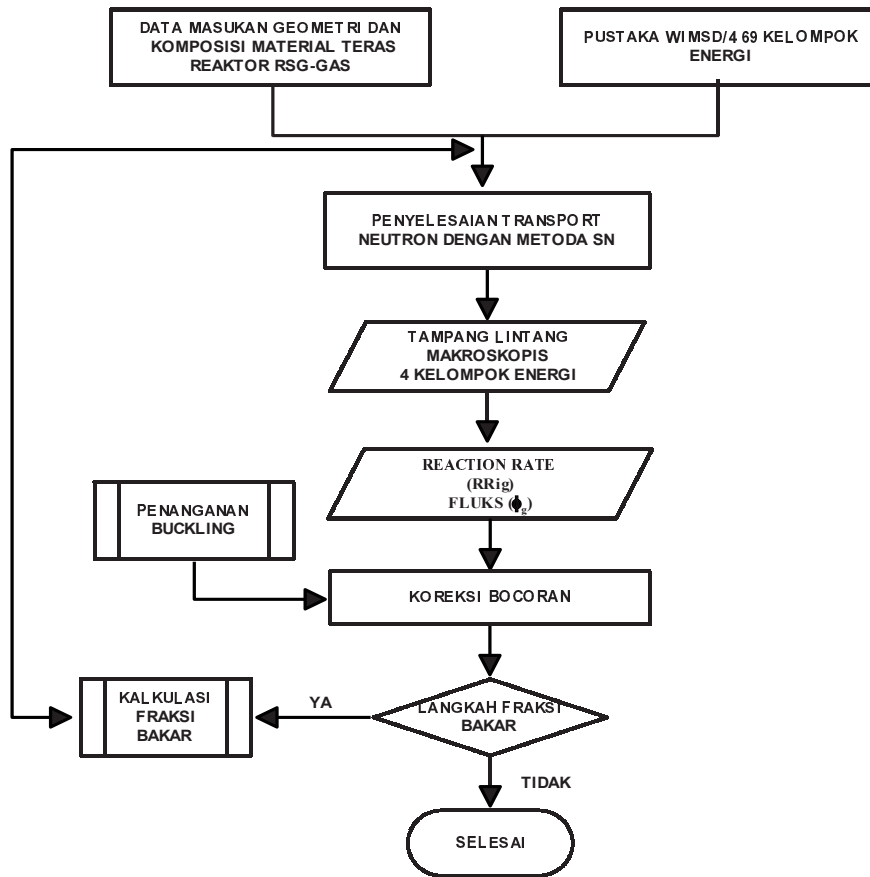


Gambar 4. Model sel elemen bakar RRI

Konstanta makroskopik dihitung oleh 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 1×10^{-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 tanpa dan teras setimbang. Pembangkitan konstanta kelompok difusi neutron dalam kondisi temperatur kamar (20°C) sebagai fungsi fraksi bakar.

- Pembangkitan konstanta kelompok difusi neutron dalam kondisi temperatur bahan bakar (*meat*) divariasi dari 20°C hingga 200°C .
- Pembangkitan konstanta kelompok difusi neutron dalam kondisi temperatur moderator divariasi dari 20°C hingga 100°C . Dalam langkah ini densitas moderator tidak berubah.
- Pembangkitan konstanta kelompok difusi neutron dalam kondisi densitas moderator diubah dari $0,9982 \text{ g/cm}^3$ ke $0,9958 \text{ g/cm}^3$. Walaupun temperatur moderator dijaga tetap, akan tetapi rentang kerapatan ini identik dengan temperatur air dari 20°C hingga 35°C .
- Pembangkitan konstanta kelompok difusi neutron dalam densitas moderator diubah dengan kekosongan dari 0 hingga 40 % volume void.

Berdasarkan urutan seperti di atas maka dihitung generasi sel untuk membangkitkan konstanta kelompok material teras dengan program WIMSD-5B seperti diagram alir pada Gambar 5.



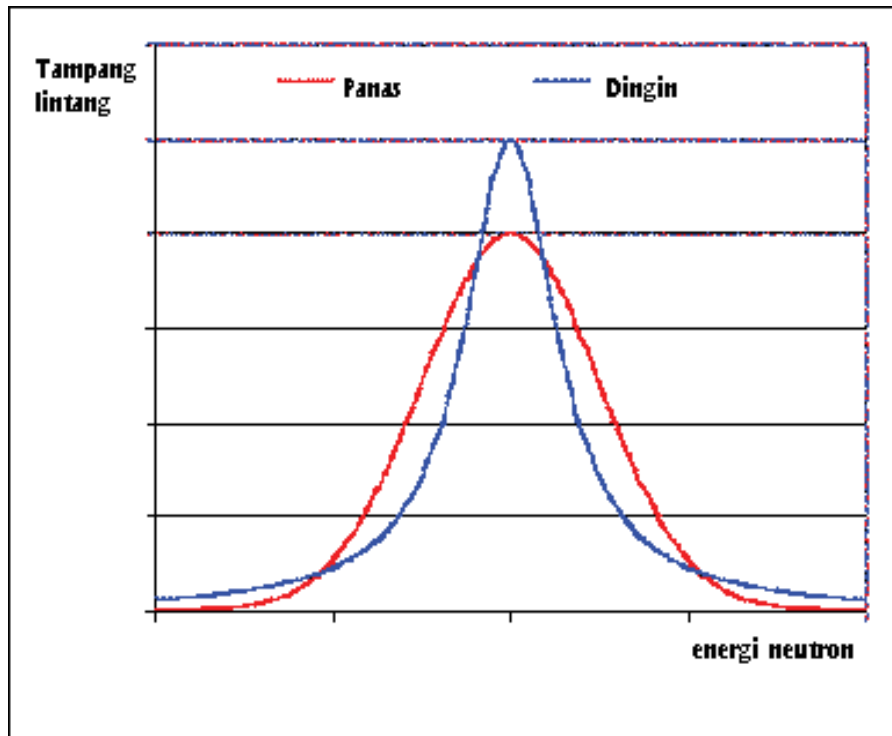
Gambar 5. Diagram alir program WIMSD-5B[11]

Perhitungan Teras

Selanjutnya dilakukan perhitungan teras dengan paket program Batan-2DIFF. Distribusi fraksi bakar penyusun teras pada awal siklus (BOC) diperoleh dari hasil penelitian sebelumnya seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2. Konstanta kelompok difusi neutron sebagai fungsi temperatur dan densitas yang sesuai dengan fraksi bakar teras diperoleh dengan cara interpolasi. Dengan menggunakan konstanta tampang lintang yang telah diinterpolasi dilakukan perhitungan koefisien reaktivitas bahan bakar, moderator dan void serta densita moderator. Hasil yang diharapkan dari perhitungan ini semua adalah koefisien reaktivitasnya negatif. Jika nilainya tidak negatif maka desain teras tersebut akan ditolak karena sangat membahayakan terhadap keselamatan operasi reaktor.

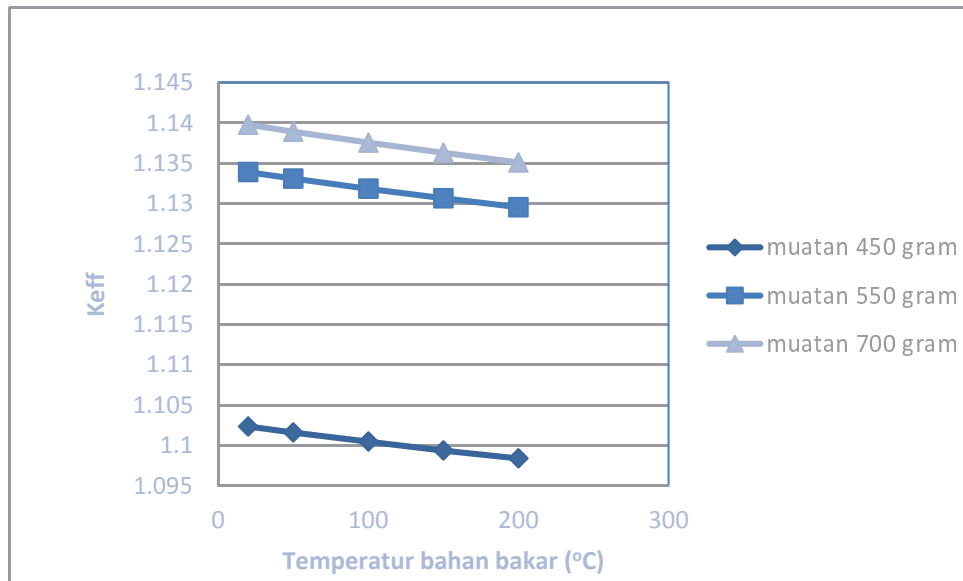
HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil perhitungan, bentuk konfigurasi teras setimbang yang terpilih dinyatakan dalam Gambar 3 yaitu konfigurasi teras 5×5 yang terdiri dari 16 elemen bakar standar (FE) dan 4 elemen bakar kendali (CE) serta 3 posisi iradiasi dalam teras (IP0, IP1 dan IP2). Hasil perhitungan parameter teras setimbang reaktor RRI untuk konfigurasi teras dapat dilihat pada Tabel 2. Perlu diketahui sebagai desain awal bahwa margin padam minimum atau reaktivitas padam harus dipenuhi yang merupakan persyaratan mutlak untuk desain teras setimbang.



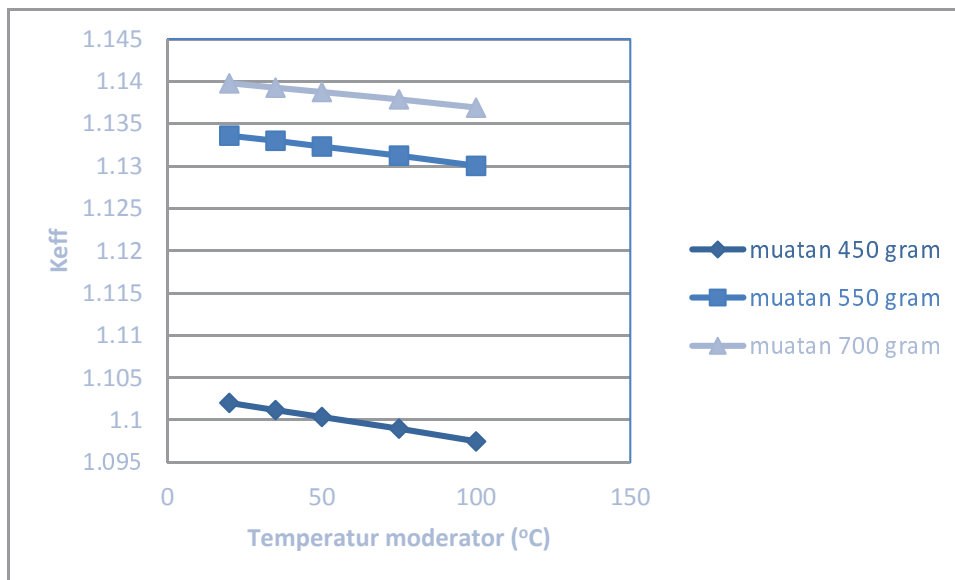
Gambar 6. Tampang lintang resonan pada bahan bakar [12]

Jika pada bahan bakar terjadi kenaikan temperatur maka tampang lintang *resonance capture* puncak akan turun pada U-238 ditunjukkan pada Gambar 6 atau terjadi *resonance broadening* akan menyebabkan kehilangan neutron pada penyerapan energi resonan pada U-238 akan naik sehingga mengakibatkan spektrum neutron akan berubah ke arah keras dan k_{eff} turun (energi resonan 7eV – 200 eV). Rasio $[\sigma_f/\sigma_a]_f$ akan berubah besarnya tergantung bahan bakarnya baru atau equilibrium. Untuk bahan bakar baru rasionya turun sedangkan jika bahan bakar yang mempunyai fraksi bakar maka terdapat plutonium di dalam bahan bakar sehingga rasionya naik. Dengan kata lain, jika temperatur sistem naik energi neutron naik sehingga rasio tampang lintang turun sering disebut dengan peristiwa *hot neutron effect*. Hal ini akan menyebabkan pada U-235 tampang lintang fisinya turun menghasilkan nilai k_{eff} turun tetapi nilai tampang lintang fisi untuk Pu-239 naik sehingga k_{eff} naik. Kombinasi keduanya akan menghasilkan lebih besar pengaruh yang pertama dari yang kedua sehingga menyebabkan reaktivitas turun dan koefisien reaktivitas bahan bakar negatif. Namun pada teras setimbang (*equilibrium core*) jika fraksi bakar terlalu besar dapat menyebabkan nilai koefisien reaktivitas bahan bakar justru positif. Hal ini tidak diminati oleh desiner teras reaktor riset. Koefisien reaktivitas bahan bakar bersifat *prompt* (< 1 sekon) sehingga keselamatannya terhadap bahan bakar signifikan sering disebut dengan *inherent safety*[13].



Gambar 7. Nilai k_{eff} fungsi temperatur bahan bakar teras RRI

Gambar 7. menunjukkan nilai k_{eff} dengan berubahnya temperatur bahan bakar. Dapat ditunjukkan pada gambar bahwa nilai k_{eff} turun dengan naiknya temperatur bahan bakar untuk semua muatan bahan bakar (400 g, 550 g dan 700 g). Sehingga nilai koefisien reaktivitas umpan balik sebagai fungsi temperatur untuk teras setimbang RRI dengan densitas 5,34 g/cm³; 6,52 g/cm³ dan 8,30 g/cm³ adalah negatif. Perubahan reaktivitas akibat temperatur bahan bakar memberikan pengaruh yang besar dibanding pengaruh kerapatan moderator dan temperatur bahan bakar dan sifatnya spontan (*prompt reactivity feedback*).

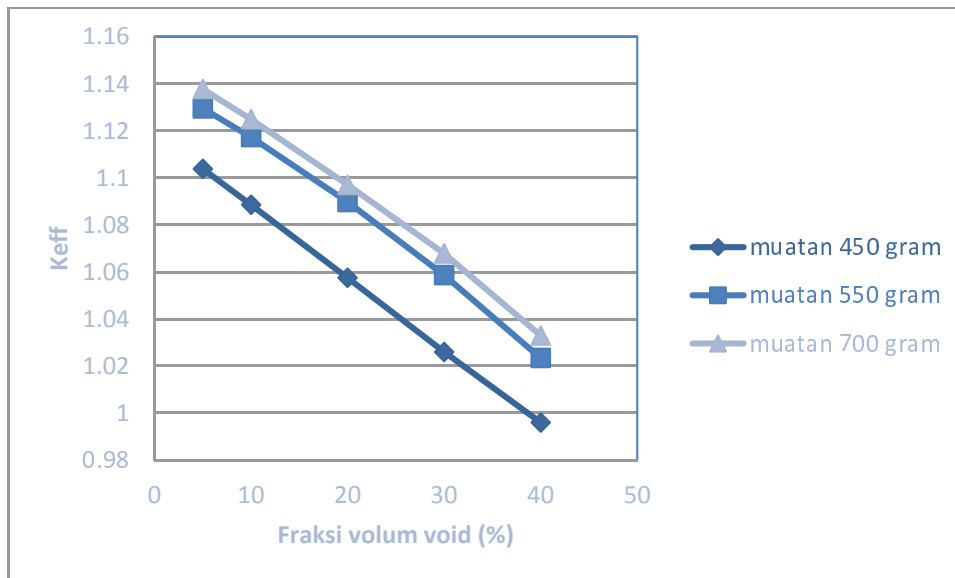


Gambar 8. Nilai k_{eff} fungsi temperatur moderator teras RRI

Pada Gambar 8 dapat dilihat nilai k_{eff} teras RRI dengan berubahnya temperatur moderator. Perubahan temperatur moderator, tanpa perubahan kerapatan, mengakibatkan bertambahnya serapan resonansi dan tangkapan-pembelahan (η). Bertambahnya serapan resonansi membuat nilai k_{eff}

berkurang sedangkan tangkapan pembelahan membuat nilai k_{eff} bertambah. Penambahan ini lebih kecil dibanding efek Doppler akibat naiknya temperatur bahan bakar. Secara total yang dapat dirasakan teras reaktor dengan bertambahnya temperatur akan menyebabkan turunnya nilai reaktivitas teras. Hal ini terlihat dengan nilai koefisien reaktivitas yang negatif.

Gambar 9 menunjukkan nilai k_{eff} teras RRI sebagai fungsi fraksi volum void. Nilai k_{eff} turun dengan bertambahnya fraksi void di dalam teras. Hal ini menunjukkan bahwa nilai koefisien reaktivitas void dalam teras RRI adalah negatif. Sehingga teras RRI dapat disebut bersifat *under moderated*.



Gambar 9. Nilai k_{eff} fungsi fraksi volum void teras RRI

Nilai koefisien reaktivitas akibat perubahan densitas moderator teras RRI (KRDM) dengan muatan 450 gram paling besar dibanding dengan muatan lainnya. Koefisien reaktivitas ini juga sangat signifikan untuk menyumbangkan umpan balik negatif terhadap teras. Perubahan reaktivitas akibat perubahan densitas moderator air sementara itu temperaturnya dipertahankan pada temperatur kamar, memberikan pengaruh yang lebih kecil dibanding pengaruh temperatur bahan bakar. Hal ini diakibatkan perubahan kerapatan air merubah konstanta kelompok difusi sehingga mengurangi kemampuan hamburan dan menambah tangkapan resonansi.

Tabel 3. Koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar teras RRI

Temperatur (°C)	Koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar (α_f) (% $\Delta k/k^\circ C$)		
	450 g	550 g	700 g
20 - 200	$-1,6 \times 10^{-3}$	$-2,0 \times 10^{-3}$	$-2,2 \times 10^{-3}$

Tabel 3 menunjukkan nilai koefisien reaktivitas umpan balik temperatur bahan bakar untuk teras setimbang RRI dengan muatan 450 g, 550 g dan 700 g. Perubahan reaktivitas akibat kenaikan temperatur bahan bakar yang divariasikan dari temperatur 20 - 200 °C kemudian dirata-ratakan. Sehingga diperoleh nilai koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar seperti Tabel 3. Semakin besar

jumlah muatan bahan bakar maka nilai koefisien reaktivitas semakin kecil. Hal ini disebabkan oleh karena jumlah U-238 di dalam teras semakin banyak sehingga neutron semakin cepat diserap oleh material uranium namun tidak berfisi sehingga reaktivitasnya semakin kecil. Efek Doppler juga berpengaruh dengan perubahan massa yang terjadi di dalam teras sehingga menyumbangkan reaktivitas negatif. Sebagai referensi hasil perhitungan dengan program komputer yang sama pada teras RSG-GAS berbahan bakar uranium silisida densitas 2,96 g/cm³ pengkayaan rendah adalah -1,65x10⁻³ %Δk/k⁰C[11].

Tabel 4 menunjukkan bahwa perubahan reaktivitas akibat kenaikan temperatur moderator untuk teras setimbang RRI dengan muatan 450 g, 550 g dan 700 g. Perubahan reaktivitas akibat kenaikan temperatur moderator yang divariasikan dari 20 – 100 °C kemudian dirata-ratakan. Semakin besar jumlah muatan bahan bakar nilai koefisien reaktivitas moderatornya semakin besar. Hal ini disebabkan oleh karena terjadinya perubahan temperatur moderator, tanpa perubahan kerapatan, mengakibatkan bertambahnya serapan resonansi dan tangkapan-pembelahan (η). Bertambahnya serapan resonansi membuat nilai k_{eff} berkurang sedangkan tangkapan pembelahan membuat nilai k_{eff} bertambah. Penambahan ini lebih besar dibanding muatan bahan bakar yang kecil. Secara total yang dapat dirasakan teras reaktor dengan bertambahnya jumlah atom U-238 akan menyebabkan naiknya nilai reaktivitas teras. Hal ini terlihat dengan nilai koefisien reaktivitas yang negatif di dalam Tabel 4.

Tabel 4. Koefisien reaktivitas temperatur moderator teras RRI

Temperatur (°C)	Koefisien reaktivitas temperatur moderator (α_m) (%Δk/k ⁰ C)		
	450 g	550 g	700 g
20-100	-4,4x10 ⁻³	-2,7x10 ⁻³	-2,4x10 ⁻³

Jika temperatur moderator naik akan menurunkan tampang lintang absorpsi uranium sehingga menurunkan nilai faktor kerugian termal (*thermal disadvantage factor* = ϕ_m/ϕ_u) nilai harga k_{eff} naik maka nilai reaktivitas akan naik. Nilai yang diperoleh dari hasil perhitungan Batan-2DIFF untuk teras RRI sangat bersesuaian dengan hasil yang diharapkan. Jika dibandingkan dengan referensi hasil perhitungan dengan program komputer yang sama pada teras RSG-GAS berbahan bakar uranium silisida densitas 2,96 g/cm³ adalah -7,70x10⁻³ %Δk/k⁰C[11]. Hasilnya berbeda karena densitas bahan bakarnya berbeda dimana semakin kecil densitas bahan bakar semakin kecil nilai koefisien reaktivitas moderatornya.

Tabel 5. Koefisien reaktivitas void teras RRI

Fv (% volum void)	Koefisien reaktivitas void (α_v) (%Δk/k/fraksi volum void)		
	450 g	550 g	700 g
5	0	0	0
10	-0,018	-0,180	-0,204
20	-0,023	-0,223	-0,230
30	-0,029	-0,270	-0,290
40	-0,033	-0,325	-0,343

Untuk perhitungan void teras RRI dengan muatan bahan bakar 450 g, 550 g dan 700 g dapat dilihat pada Tabel 5. Sesungguhnya fraksi void tidak izinkan terjadi di dalam teras reaktor riset seperti RRI namun karena moderator atau pendinginnya air hal ini memungkinkan untuk mendidih dan terjadi void apabila terjadi gangguan. Untuk itulah, dalam hal pengajuan lisensi maka pihak Bapeten selalu

mensyaratkan agar koefisien reaktivitas void harus dihitung. Jika dibandingkan koefisien reaktivitas void ke 3 muatan bahan bakar tersebut maka nilai koefisien reaktivitas terhadap fraksi volum void semakin kecil. Dalam desain reaktor riset diinginkan koefisien reaktivitas void besar karena baik untuk stabilitas dan keselamatan operasi reaktor namun jika terlalu besar maka dibutuhkan sistem kontrol yang pergerakannya sangat cepat. Koefisien reaktivitas void sebagai fungsi volume void dapat dilihat pada Tabel 5. Nilai koefisien untuk ke tiga muatan yang berbeda sangat sensitif terhadap reaktivitas teras namun bertambah besarnya fraksi volum void akan mengurangi reaktivitas yang cukup signifikan yang dapat dinyatakan dengan nilai k_{eff} nya. Semakin besar volume void koefisiennya menuju nol atau tidak ada umpan balik melalui void. Jika dibandingkan dengan referensi hasil perhitungan teras RSG-GAS berbahan bakar silisida teras RSG-GAS adalah $-1,34 \times 10^{-1} \% \Delta k/k / \text{fraksi volum void}$.

Tabel 6. Koefisien reaktivitas akibat perubahan densitas moderator

Densitas moderator g. cm ⁻³	Koefisien reaktivitas densitas moderator (α_m) (% $\Delta k/k$ m ⁻³ kg)		
	450 g	550 g	700 g
0,9982-0,9959	-0,196	-0,185	-0,187

Tabel 6 menunjukkan nilai koefisien reaktivitas moderator akibat densitas air berubah dimana temperatur bahan bakar dan moderator dipertahankan tetap. Dari hasil yang diperoleh bahwa nilainya bertambah kecil namun tidak linier terhadap densitas. Hal ini disebabkan jika densitas moderator semakin kecil maka neutron bermoderasi semakin kecil juga sehingga menurunkan nilai k_{eff} dan menurunkan nilai reaktivitas teras. Hasil perhitungan referensi teras RSG-GAS adalah -0,141 % $\Delta k/k/m^3$ kg [11].

KESIMPULAN

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar, moderator dan fraksi volum void serta densitas moderator adalah negatif untuk semua muatan. Dari hasil tersebut terlihat bahwa dengan naiknya muatan bahan bakar maka nilai koefisien reaktivitas rerata menurun. Dari seluruh nilai reaktivitas yang paling besar pengaruhnya terhadap umpan balik reaktivitas adalah koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar namun perubahannya tidak signifikan dengan kenaikan muatan bahan bakar. Perubahan reaktivitas dengan kenaikan temperatur bahan bakar dan moderator besarnya tidak linier terhadap kenaikan temperatur. Namun hal ini sudah memenuhi persyaratan yang ditetapkan yaitu setiap teras harus mempunyai koefisien reaktivitas negatif.

UCAPAN TERIMAKASIH

Dalam kesempatan ini kami juga mengucapkan terima kasih kepada Bapak Dr. Setiyanto MSc. yang telah menyediakan kesempatan kepada kami dalam pelaksanaan penelitian ini melalui Program DIPA tahun 2013.

DAFTAR PUSTAKA

1. V.K., Raina, K. Sasidharan, Samiran Sengupta, Tej Singh. Multi Porpuse Reactor. Nucl. Eng. April 2006; 7-8: 770-783
2. Teruel, FE, Rizwan-uddin. An innovative research reactor design. Nucl. Eng. Des 2009; 239:395-407
3. Lily Suparlina. Kajian Desain konfigurasi teras reaktor riset untuk persiapan rancangan reaktor riset baru di Indonesia. Prosiding Seminar PPI-PDIPTN Pustek Akslerator dan Proses Bahan, Batan Yogyakarta 2006
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. Daniel M, Wachs, Curtis R, Clark, Randall J, Dunavant. Conceptual process description for themanufacture of LEU- Molybdenum fuel. IL/EXT-08-13840, Departement of Energy National Laboratoty, Idaho, USA 2008.
6. Liem, P.H., Batan-FUEL: A General In-Core Fuel Management Code. Atom Indonesia 1996, 22, No. 2:78.
7. WIMS-D5. OECD/NEA Data Bank Documentation, Package ID No. 1507/02; 1998
8. IAEA. WIMS-D Library Update. IAEA, Vienna, 2007.
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. Tukiran S. Surian P, Tagor MS, Lily S, Jati S. Desain konseptual teras reaktor riset inovatif berbahan bakar Uranium–Molibdenum dari Aspek Neutronik. Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir Tri Dasa Mega Vo. 14, No. 3, Oktober 2012: 178-191
11. Tukiran S. Analisis pengaruh densitas bahan bakar silisida terhadap parameter kinetik teras RSG-GAS. Presentasi Ilmiah Jabatan Peneliti Utama PTRKN-Batan, November 2012
12. Tukiran S. Analisis pengaruh densitas pada koefisien reaktivitas temperatur bahan bakar. Prosiding Seminar PPI-PDIPTN Pustek Akslerator dan Proses Bahan, Batan Yogyakarta 2006
13. Rokhmadi. Analisis parameter kinetik reaktor RSG-GAS berbahan bakar silisida dengan berbagai kerapatan uranium. Presentasi Ilmiah Jabatan Peneliti Madya PTRKN-BATAN, Serpong, April 2008.