

VERIFIKASI NILAI REAKTIVITAS LEBIH TERAS SETIMBANG RSG-GAS SETELAH 30 TAHUN BEROPERASI

Rokhmadi dan Tukiran Surbakti
Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir, BATAN
Kawasan Puspiptek GD 80 Tangerang Selatan 15310, Banten
Email:rokhmadi@batan.go.id

ABSTRAK

VERIFIKASI NILAI REAKTIVITAS LEBIH PADA TERAS SETIMBANG RSG GAS SETELAH 30 TAHUN BEROPERASI. Dalam rangka untuk menjamin keselamatan operasi reaktor RSG-GAS, harus dilakukan review terhadap parameter keselamatan operasi teras yang sering disebut dengan *periodic safety review* (PSR). Tujuannya adalah untuk melakukan verifikasi terhadap nilai parameter yang terkait dengan keselamatan yang ada di dalam Laporan Analisis Keselamatan (LAK), di mana aspek neutronik termasuk di dalamnya. Pada aspek ini dilakukan verifikasi terhadap reaktivitas lebih teras setimbang RSG-GAS setelah 30 tahun beroperasi melalui perhitungan menggunakan paket program WIMSD-5B/Batan-FUEL. Dari hasil perhitungan diperoleh nilai reaktivitas lebih pada teras setimbang RSG-GAS tanpa Xenon sebesar 7,7 %. Sedangkan nilai reaktivitas lebih hasil eksperimen teras RSG- GAS sebesar 7,4 %. Dari kedua nilai tersebut diperoleh hasil perhitungan verifikasi menunjukkan bahwa nilai perhitungan sesuai dengan nilai eksperimen dengan perbedaan 5 %.

Kata kunci: verifikasi, reaktivitas lebih, reaktor RSG-GAS , WIMSD-5B, Batan-FUEL

ABSTRACT

VERIFICATION OF EXCESS REACTIVITY VALUE ON GAS-RSG EQUILIBRIUM CORE AFTER 30 YEARS OF OPERATIONS. *In order to ensure the safety of the RSG-GAS reactor operation, a review of the safety parameters of the core operation must be carried out, referred to a periodic safety review (PSR). The aim of this research is to verify the value of parameters related to safety contained in the SAR (Safety Analysis Report), in which the neutronic aspects are included. In this aspect, verification of the equilibrium reactivity of the RSG-GAS core after 30 years of operation is performed through calculations using the WIMSD-5B / Batan-FUEL program package. From the calculation results, the excess reactivity value of 7.7 % on the equilibrium RSG-GAS core is obtained without Xenon. While the excess reactivity value of the RSG-GAS core from experiment is 7.4 %. From the two values obtained indicated the calculated value is in accordance with the experimental value with a difference of 5 %.*

Keywords: verification, excess reactivity, RSG-GAS Reactor, WIMSD-5B, Batan-FUEL

PENDAHULUAN

Saat ini Pusat Reaktor Serba Guna (PRSG), Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN), selaku Pengusaha Instalasi Nuklir (PIN) yang mengoperasikan reaktor RSG-GAS sedang mengajukan perbaikan dokumen LAK ke Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN) sehubungan dengan izin operasi reaktor tersebut. Sejalan dengan proses perbaikan tersebut, BAPETEN selaku unit pendukung teknis melakukan pengkajian independen terhadap keselamatan reaktor RSG-GAS terkait dengan tugas pengawasan. Hasil kajian ini digunakan untuk memberikan dukungan teknis kepada Direktorat Perizinan dalam rangka proses evaluasi LAK. Penelitian ini menyajikan perhitungan reaktivitas lebih pada teras setimbang RSG-GAS pada kondisi *Beginning of Cycle* (BOC). Hal ini penting untuk dilakukan karena nilai reaktivitas lebih teras setimbang BOC merupakan parameter yang terkait langsung dengan kemampuan batang kendali dalam memadamkan operasi reaktor [1]. Karena itu, maka batasan reaktivitas lebih pada teras setimbang awal sangat terkait dengan keselamatan operasi reaktor. Perhitungan reaktivitas lebih pada teras setimbang BOC ini dilakukan menggunakan paket program WIMSD-5B/Batan-FUEL [2]. Kajian ini dimaksudkan untuk mendapatkan nilai reaktivitas lebih pada teras setimbang awal

tanpa xenon dengan menggunakan paket program WIMSD-5B/Batan-FUEL. Kajian dilakukan guna mendukung evaluasi LAK reaktor RSG-GAS, yakni verifikasi pada nilai reaktivitas lebih teras setimbang BOC. Hasil perhitungan akan dibandingkan dengan hasil eksperimen teras kerja RSG-GAS. Penelitian ini dilakukan dalam rangka review keselamatan berkala teras RSG-GAS

DESKRIPSI TERAS RSG-GAS

Reaktor Serba Guna G.A.Siwabessy (RSG-GAS) merupakan reaktor riset jenis MTR (*Material Testing Reactor*) pertama di dunia yang dioperasikan langsung dengan menggunakan elemen bakar pengkayaan Uranium rendah, LEU (*Low Enriched Uranium*) [3]. Pada saat rancang bangun RSG-GAS dilaksanakan, hanya tersedia elemen bakar LEU jenis oksida (U_3O_8-Al) yang dapat digunakan untuk memenuhi spesifikasi yang ditentukan. Oleh karena itu RSG-GAS pada awalnya menggunakan bahan bakar oksida dengan densitas Uranium dalam meat sebesar $2,96 \text{ g/cm}^3$ dengan pengkayaan ^{235}U sebesar 19,75 % [4]. Dalam rangka meningkatkan kinerja reaktor, telah dilakukan konversi teras RSG-GAS dari bahan bakar oksida menjadi silisida. Hal ini dilakukan karena penggunaan bahan bakar silisida dengan densitas Uranium yang lebih tinggi dapat meningkatkan panjang siklus operasi reaktor

[5]. Susunan teras setimbang (TWC) seperti ditunjukkan pada Gambar 1 merupakan konfigurasi teras setimbang (TWC) silisida RSG-GAS. Teras aktif dari TWC terdiri atas 40 elemen bakar standar (EB), 8 elemen bakar kendali, satu posisi iradiasi di tengah yang besar yang terdiri atas 2 x 2 posisi kisi teras, dan 4 posisi iradiasi di dalam teras reaktor, masing-masing mengambil satu posisi kisi teras, sehingga keseluruhan teras setimbang terdiri atas 960 pelat elemen bakar, yang berarti identik dengan 45,7 elemen bakar standar [6].

1. Teras Reaktor

Teras reaktor terdiri dari *grid-grid* yang membentuk matrik 10 x10. Pada teras aktif, grid teras akan membentuk matrik 8,8 yang digunakan sebagai tempat elemen bakar, elemen kendali, elemen reflektor, fasilitas iradiasi. Pada salah satu sudutnya, teras diselubungi oleh blok reflektor berbentuk L yang terbuat dari bahan berilium yang berfungsi sebagai pemantul atau reflektor untuk memantulkan kembali neutron yang lolos dari teras [7]. Air ringan (H₂O) sebagai pendingin dialirkan melalui komponen-komponen teras untuk mengambil panas dan dibuang melalui sistim pendingin sekunder.

2. Elemen Bakar

RSG-GAS secara desain menggunakan elemen bakar U₃O₈Al berbentuk plat jenis MTR dengan pengkayaan

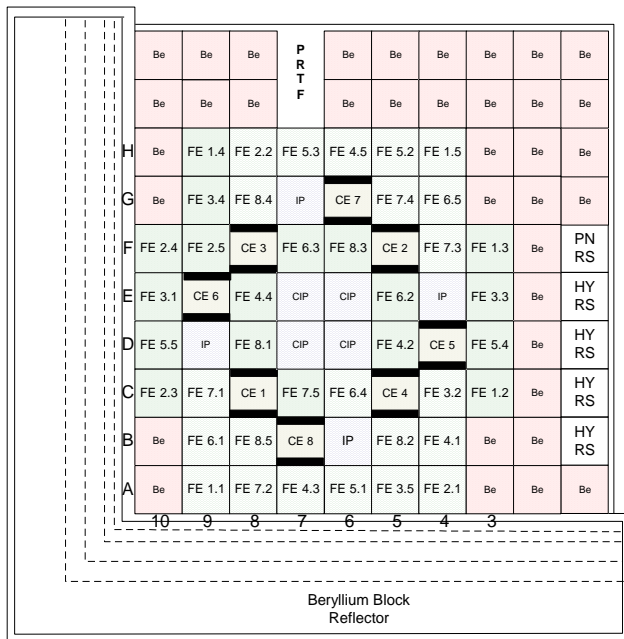
uranium (²³⁵U) 19,75 % dan kerapatannya 2,96 g/cm³. Setiap elemen bakar terdiri dari 21 plat dengan ukuran panjang 625 mm, lebar 70,75 mm, sedangkan plat bahan bakar aktif mempunyai ukuran tebal 1,30 mm, panjang 600 mm, lebar 62,75 mm. Plat yang digunakan terbuat dari bahan AlMg. Tiap elemen bakar rata-rata mengandung 250 gram uranium. Namun pada saat ini RSG-GAS telah menggunakan bahan bakar silisida 250 g dengan geometri dan parameter lainnya sama dengan bahan bakar desain [8].

Pada kondisi teras kerja (TWC: *Typical Working Core*) jumlah elemen bakar 40 buah dan distribusi burn-up (fraksi bakar) terdiri atas 8 kelompok dengan burn-up rerata awal siklus 23,3 % dan rerata akhir siklus 31,3 %. Pada setiap siklus akan diadakan pergantian 5 elemen bakar dan 1 elemen kendali yang fraksi bakar reratanya sekitar 56 % [9].

3. Elemen Kendali

Batang kendali yang digunakan pada RSG-GAS terbuat dari bahan AgInCd (85 %, 10 %, 5 %) dengan bentuk garpu (*fork-type*) dan dibungkus dengan baja tahan karat (*Stainless Steel*) [10]. Setiap elemen kendali terdiri dari 15 plat elemen bakar dan 2 bilah penyerap neutron (*blade*). Dalam pengoperasiannya RSG-GAS menggunakan 8 batang kendali yang terdiri atas 7 Shim rod dan 1 Regulating rod. Batang kendali ini ditempatkan pada posisi tertentu di dalam

teras reaktor. Posisi batang kendali di dalam teras dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Konfigurasi teras RSG-GAS [11]

METODOLOGI

Perhitungan dilakukan pada teras setimbang daya nominal 15 MW dan bebas xenon dan Samarium. Tahapan perhitungan adalah sebagai berikut:

1. Perhitungan Sel

Program WIMSD-5B hanya mampu melakukan perhitungan transport neutron satu dimensi, sehingga perlu dilakukan pemodelan terhadap sel-sel teras. Pemodelan sel digunakan untuk perhitungan pembangkitan konstanta kelompok. Pembangkitan konstanta kelompok dimaksudkan untuk mendapatkan nilai rerata konstanta kelompok dalam suatu sel dengan cara menghomogenkan sel tersebut. Perhitungan konstanta kelompok

dilakukan untuk semua material penyusun teras dalam kondisi seperti di atas.

a. Bahan Bakar

Model perhitungan untuk bahan bakar adalah multi slab. Pada pemodelan ini satu elemen bahan bakar yang terdiri dari 21 plat elemen bakar dibuat menjadi 21 slab material yang tersusun berurut. Setiap slab terdiri dari meat, kelongsong dan moderator dengan tebal masing-masing: 0,027 cm; 0,038 cm; dan 0,1925 cm [12]. Slab ini mempunyai panjang sesuai dengan panjang material aktif. Material lain yang di luar panjang aktif dihomogenisasi dan dinormalisir terhadap panjang aktif dan dinamakan "extra region". Pada elemen bahan bakar extra region terdiri dari bahan $AlMg_2$ dan air, sedangkan "meat" terdiri dari ^{235}U dan ^{238}U , kelongsong terdiri dari $AlMg_2$ dan moderator terdiri dari H_2O .

b. Elemen Kendali

Model perhitungan untuk bahan kendali dibagi dalam dua region. Region pertama merupakan daerah aktif yang terdiri dari 15 plat elemen bakar dibuat menjadi 15 slab material yang tersusun berurutan. Pemodelannya sama dengan bahan bakar, hanya berbeda pada daerah extra regionnya. Region kedua adalah region penyerap. Region ini dibagi dalam 9 slab dan 1 extra region. Posisi batang kendali pada daerah penyerap neutron berisi

AgInCd dan SS-321. Untuk mendapatkan penampang lintang makroskopik pada region ini maka dalam perhitungan region ini digabung dengan region pertama.

c. *Bahan-Bahan non-fisi.*

Untuk bahan-bahan non fisi, dimodelkan sama seperti bahan fisi dimana pada slab aktif akan diberi sedikit kandungan ^{235}U , kemudian dilakukan homogenisasi di semua daerah.

Langkah yang dilakukan dalam perhitungan reaktor secara umum dapat dilihat pada Gambar 2. Setelah diketahui bentuk reaktor maka proses penyiapan data tampang lintang merupakan langkah yang sangat penting yang harus dikerjakan. Proses penyiapan data tampang lintang makroskopik dapat dilakukan dengan menggenerasi tampang lintang material pembentuk teras reaktor dengan paket program WIMSD-5B. Program ini telah banyak digunakan orang untuk menggenerasi tampang lintang khususnya di Eropa. Dalam makalah ini dibutuhkan penyiapan data tampang lintang teras RSG-RAS berbahan bakar silisida dengan muatan 250 g. Dalam penyiapan data tampang lintang, bahan bakar yang digunakan adalah tipe pelat dimodel dengan muti slab seperti Gambar 3. Komposisi bahan bakar adalah $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ dengan pengkayaan 19,75 % dan dihitung berdasarkan komposisi unsur penyusunnya.

Data penting lainnya dapat di lihat pada Tabel 1. Model multi slab dan komposisi bahan bakar ini digunakan sebagai masukan pada program WIMSD-5B. Daerah bahan bakar dan pendingin dihomogenisasi sehingga sehingga diperoleh kisi homogen.

Untuk perhitungan parameter kisi digunakan metode DSN (*direct scattering neutron*) dengan energi neutron dibagi menjadi 4 group, titik mesh 138. Geometri sel terdiri dari 4 material yaitu bahan bakar, kelongsong, pendingin dan ekstra region. Geometri sel digenerasi sebagai fungsi 17 step derajat bakar. Parameter kisi dihitung dalam kondisi [13]:

- *Hot* Xe dan Sm setimbang (IFS4).
- *Hot*, bebas Xe dan Sm setimbang (IFS3)
- *Cold*, bebas Xe dan Sm setimbang (IFS2)
- *Cold*, bebas Xe dan Sm (IFS1)

2. Perhitungan teras

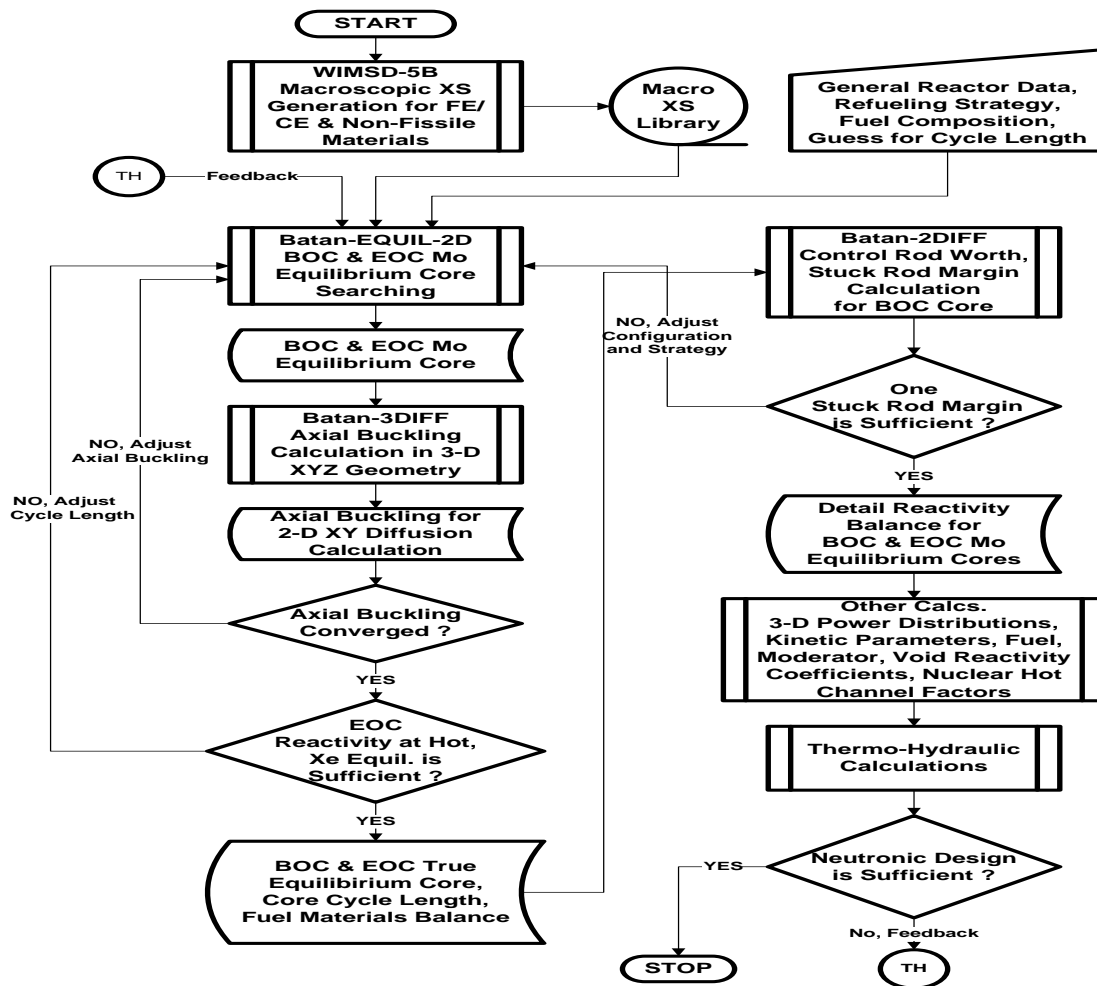
Perhitungan teras dilakukan untuk mencapai teras setimbang reaktor RSG-GAS. Perhitungan teras dilakukan dengan menggunakan program Batan-FUEL. Diagram alir perhitungan teras dengan program Batan-FUEL ditunjukkan pada Gambar 2. Teras dimodelkan dalam bentuk geometri X-Y dua dimensi. Dalam perhitungan ini, daya reaktor ditetapkan pada 15 MW sesuai dengan eksperimen dan ditentukan efek dari pemuatan bahan bakar

pada teras RSG-GAS terhadap reaktivitas lebih. Pemuatan bahan bakar dilakukan secara bertahap dengan menyisakan bahan bakar 12 diluar teras. Kemudian reaktor dioperasikan, kemungkinan besar reaktor belum kritis namun sudah mendekati kritis. Kemudian ditambah satu persatu ke dalam teras sehingga diperoleh data berapa jumlah bahan bakar di dalam teras pada kritis pertama. Tujuan memperoleh reaktivitas lebih adalah supaya reaktor dapat dioperasikan sepanjang satu siklusnya. Karena panjang siklus adalah parameter yang mempengaruhi reaktivitas teras, sehingga perhitungan teras dilakukan untuk panjang siklus yang memenuhi kriteria keselamatan yaitu kriteria batang kendali terbesar macet satu reactor masih sub-kritis. Disebut batang yang macet, jika batang kendali yang memiliki nilai reaktivitas terbesar tidak berhasil masuk ke dalam teras maka teras reaktor harus dalam kondisi sub-kritis. Jika kriteria batang kendali macet tidak terpenuhi, maka dilakukan pengaturan kembali posisi letak bahan bakar. Demikian juga untuk faktor puncak daya, jika nilai PPF maksimum melebihi batas yang ditetapkan, dilakukan konfigurasi ulang dimana posisi dan lokasi bahan bakar yang disusun ulang di dalam teras sehingga nilai maksimum PPF berkurang. Perhitungan teras dilakukan untuk 5 teras setimbang yaitu teras 87, 88, 89, 90, dan 91.

Reaktivitas lebih teras setimbang RSG-GAS pada BOC merupakan kondisi yang penting dalam disain teras reaktor. Reaktivitas lebih teras setimbang RSG-GAS pada kondisi BOC merupakan pembatas dalam kaitannya dengan analisis terhadap kemampuan dari batang kendali untuk memadamkan reaktor. Penentuan nilai reaktivitas lebih teras setimbang dilakukan di awal operasi teras karena secara konservatif nilai reaktivitas lebih teras setimbang akan bernilai lebih besar dibandingkan dengan nilai reaktivitas lebih di akhir teras setimbang oleh karena pengaruh fraksi bakarnya.

Tabel 1. Data desain Teras kerja RSG-GAS [14]

Umum	
Tipe Reaktor	Tipe kolam
Tipe elemen bakar	Silisida pengkayaan rendah
Sistem pendinginan	Konveksi paksa
Moderator/pendingin	H ₂ O
Reflektor	Be & H ₂ O
Daya nominal (MW)	30
Karakteristik teras	
Jumlah elemen bakar	40
Jumlah elemen kendali	8
Jumlah penyerap tipe garpu (pasang)	8
Panjang siklus pada daya nominal (hari)	25
Fraksi bakar rerata awal siklus (% hilangnya ²³⁵ U)	23,3
Fraksi bakar rerata akhir siklus (% hilangnya ²³⁵ U)	31,3
Fraksi bakar rerata pada akhir siklus (% hilangnya ²³⁵ U)	53,7
Bahan bakar/Batang kendali	
Dimensi elemen bakar/kendali (mm)	77,1x81x600
Ketebalan pelat bakar (mm)	1,3
Lebar kanal pendingin (mm)	2,55
Jumlah pelat per elemen bakar	21
Jumlah pelat per elemen kendali	15
Material kelongsong bshsn bakar	AlMg ₂
Ketebalan kelongsong bahan bakar (mm)	0,38
Dimensi <i>Fuel Meat</i> (mm)	0,54x62,75x600
Material <i>Fuel Meat</i>	U ₂ Si ₃ Al
Pengkayaan U-235 (w/o)	19,75
Densitas Uranium dalam <i>Meat</i> (g/cm ³)	2,96
Muatan U-235 per elemen bakar (g)	250
Muatan U-235 per elemen kendali (g)	178,6
Material penyerap	Ag-In-Cd
Ketebalan bahan penyerap (mm)	3.38
Material kelongsong penyerap (mm)	SS-321
Ketebalan kelongsong penyerap (mm)	0,85



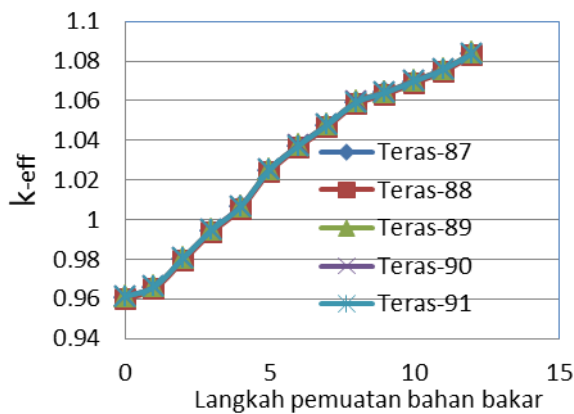
Gambar 2. Diagram alir perhitungan teras RSG-GAS dengan program Batan-FUEL [15]

HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 3 menunjukkan hasil perhitungan Batan-2DIFF bahwa nilai $k_{eff} = 1$ yaitu reaktor kritis awal terletak pada langkah ke 3 yang artinya bahwa teras RSG-GAS kritis dengan jumlah bahan bakar 31 perangkat dan 8 perangkat atang kendali untuk ke 5 teras (T-87 s/d 91). Untuk menambah reaktivitas lebih sehingga reaktor dapat beroperasi selama satu siklus yaitu 42 hari dengan daya 15 MW maka dilakukan perhitungan manajemen bahan bakar dan

hasilnya menambah 9 bahan bakar lagi sehingga di dalam teras terdapat 40 bahan bakar dan 8 batang kendali. Dari hasil perhitungan dapat dijelaskan bahwa jumlah ^{235}U di dalam teras pada saat teras penuh adalah $(250 \text{ gU} \times 40 \text{ FE}) + (8 \text{ CE} \times 178,6 \text{ gU}) = 11,4288 \text{ kg}$. Namun untuk membentuk konfigurasi teras awal maka bahan bakar yang ada tidak semuanya fresh sudah ada yang terbakar maka jumlah uranium di dalam teras seharusnya lebih kecil dari nilai di atas. Berdasarkan hasil

perhitungan Batan-2DIFF dapat dilihat pada Tabel 2. Dari Tabel 2 juga dapat dilihat bahwa selama satu siklus teras 87 reaktor RSG-GAS beroperasi ^{235}U yang habis terbakar adalah 0,737 kg selama 42 hari dengan daya 15MW. Demikian juga dengan teras 88-91 rerata ^{235}U yang terbakar hampir sama.



Gambar 3. Nilai k_{eff} setiap pemuatan bahan bakar hasil perhitungan

Tabel 2. Jumlah Uranium di dalam teras RSG-GAS hasil perhitungan

Teras	BOC		EOC	
	^{235}U (kg)	^{235}U + ^{238}U (kg)	^{235}U (kg)	^{235}U + ^{238}U (kg)
87	8,611	54,971	7,874	54,259
88	8,631	54,996	7,893	54,285
89	8,644	55,027	7,906	54,316
90	8,635	55,000	7,898	54,289
91	8,626	54,995	7,889	54,266

1. Perhitungan Reaktivitas Lebih Teras Setimbang RSG GAS

Dari Tabel 3 dapat dilihat bahwa teras RSG-GAS kritis awal setelah dimasukkan 39 bahan bakar atau pada langkah ke 3. Setelah diperoleh nilai k_{eff} dari pemodelan teras setimbang awal RSG-GAS maka perlu

dilakukan perhitungan nilai reaktivitas dengan rumus seperti di bawah ini:

$$\rho = (k_{\text{eff}} - 1) / k_{\text{eff}} \dots\dots\dots (1)$$

Berdasarkan persamaan 1 di atas, dengan memasukkan nilai k_{eff} dari pemodelan teras setimbang awal RSG-GAS (T-87) sebesar 1,083559 diperoleh nilai reaktivitas (ρ) sebesar 7,712 % atau 10.081 \$, sedangkan hasil eksperimen adalah 7,295 % atau 9,536 \$. Deviasi antara hasil perhitungan dan eksperimen adalah sekitar 5,72 %. Demikian seterusnya dapat dilihat pada Tabel 3 hasil perhitungan dan eksperimen teras RSG-GAS dari konfigurasi T-87 s/d T-91. Dari Tabel tersebut dapat dilihat deviasi rerata setiap teras adalah 5,123 %. Hasil ini sudah cukup baik karena sudah 30 tahun reaktor beroperasi dan hasil perhitungan selalu lebih besar dari hasil eksperimen. Nilai reaktivitas lebih teras setimbang BOC di LAK RSG-GAS sebesar 9,2 %. Nilai ini berdasarkan desain yang mana reaktor satu siklus beroperasi 750 MWD artinya reaktor dioperasikan pada daya 30 MW selama 25 hari. Namun saat ini reaktor dioperasikan pada daya 15 MW selama 42 hari (630 MWD) sehingga reaktivitas lebih teras juga harus disesuaikan nilainya sehingga manajemen bahan bakar di dalam terus berjalan sesuai program. Dari nilai perbedaan relatif yang masih berada di bawah 10 %, dapat dikatakan bahwa nilai

perhitungan verifikasi antara eksperimen dan perhitungan masih sesuai.

Tabel 3. Hasil perhitungan dan eksperimen reaktivitas lebih teras RSG-GAS

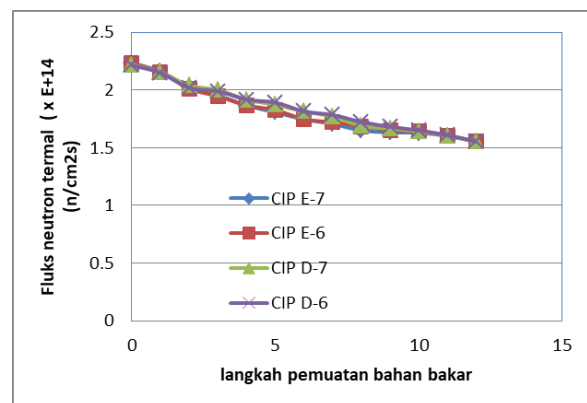
No	T-87	T-88	T-89	T-90	T-91
0	0,960824	0,960091	0,961276	0,961329	0,961252
1	0,965608	0,964880	0,966070	0,966111	0,966017
2	0,979880	0,979193	0,980400	0,980395	0,980272
3	0,994289	0,993586	0,994862	0,994837	0,994698
4	1,006240	1,005520	1,006813	1,006747	1,006572
5	1,024742	1,024036	1,025303	1,025215	1,025021
6	1,036996	1,036337	1,037584	1,037519	1,037255
7	1,047508	1,046791	1,048074	1,047988	1,047729
8	1,058983	1,058212	1,059500	1,059368	1,059150
9	1,063836	1,063097	1,064362	1,064240	1,064003
10	1,069614	1,068875	1,070161	1,070022	1,069813
11	1,075374	1,074643	1,075919	1,075782	1,075565
12	1,083559	1,082844	1,084077	1,083893	1,083679
Reaktivitas lebih C	7,712%	7,651%	7,756%	7,739%	7,722 %
Reaktivitas lebih E	7,295%	7,305%	7,465%	7,304%	7,295%
$D = (C-E) \times 100 \% / E$	5,72%	4,74%	3,39%	5,96%	5,85%

*) C= perhitungan, E= eksperimen dan D= deviasi

2. Perhitungan fluks neutron

Perhitungan fluks neutron termal pada fasilitas iradiasi teras RSG-GAS adalah merupakan tujuan akhir dari utilisasi reaktor. Fluk termal pada daerah iradiasi D-6, D-7, E-6 dan E-7 adalah yang sangat penting karena fasilitas ini merupakan fasilitas iradiasi di tengah teras dimana diharapkan mempunyai fluk neutron termal yang paling tinggi. Pada Gambar 4 diperoleh hasil bahwa nilai fluks neutron termal pada fasilitas iradiasi di tengah teras sangat tergantung pada jumlah bahan bakar didalam teras. Semakin besar jumlah bahan bakar maka fluk neutron semakin kecil artinya jumlah uranium di dalam teras menentukan besar fluks neutron temal di fasilitas iradiasi.

Semakin besar jumlah uranium di dalam teras semakin kecil fluks neutrn termal. Hal ini sangat berbanding terbalik dengan panjang siklus operasi. Semakin besar jumlah uranium di dalam teras makan panjang siklus semakin besar sehingga dalam desain teras reaktor riset diambil nilai optimal.



Gambar 4. Fluks neutron termal di CIP

Hasil perhitungan menggunakan program Batan-2DIFF pada Tabel 4 menunjukkan hasil sesuai dengan harapan yaitu pada daerah pusat fluks neutron termal rerata $1,5 \times 10^{14}$ n/cm²s pada daya 15 MW. Pada daerah posisi iradiasi D-9, B-6, E4 dan G-7 lebih

kecil lagi yaitu rerata sekitar $1,2 \times 10^{14}$ n/cm²s. Hasil perhitungan ini sudah sesuai dengan harapan dimana IP digunakan untuk iradiasi batu topas sedangkan CIP digunakan untuk iradiasi Mo dan radioisotop lainnya.

Tabel 4. Nilai fluks neutron termal pada posisi iradasi ($\times 10^{14}$ n/cm²s) hasil perhitungan

Langkah	E-7	E-6	D-7	D-6	D-9	B-6	E-4	G-7	Loading
0	2,2363	2,2342	2,2196	2,2142	1,6647	1,6081	1,5289	1,9567	0
1	2,1586	2,1552	2,1538	2,1494	1,6074	1,8464	1,4607	1,8105	A-4
2	2,0291	2,0118	2,0399	2,0191	1,6882	1,9979	1,2196	1,5203	A-9
3	1,9541	1,9473	2,0008	1,9894	1,5711	1,9856	1,1579	1,3115	B-5
4	1,8668	1,8678	1,9174	1,9172	1,4016	1,9793	1,2688	1,1805	C-3
5	1,8072	1,8269	1,8722	1,8916	1,2338	2,0297	1,4055	1,0356	C-4
6	1,7463	1,7475	1,8148	1,8155	1,4899	1,9151	1,2394	0,9911	C-10
7	1,7058	1,7214	1,7692	1,7838	1,3382	1,8566	1,4215	0,9419	D-3
8	1,6502	1,6859	1,6899	1,7231	1,1764	1,6791	1,6246	0,9587	F-3
9	1,6326	1,6517	1,6639	1,6814	1,2831	1,5906	1,5238	1,0241	F-10
10	1,6299	1,6385	1,6424	1,6506	1,2968	1,4875	1,4651	0,9938	G-8
11	1,6022	1,6055	1,6056	1,6088	1,2854	1,3792	1,4024	1,1253	H-8
12	1,5544	1,5541	1,5539	1,5537	1,2854	1,2494	1,3005	1,2404	H-9

KESIMPULAN

Dari hasil perhitungan verifikasi dengan menggunakan program komputer WIMSD-5B/Batan-FUEL diperoleh nilai reaktivitas lebih teras setimbang BOC sudah sesuai dengan harapan dimana nilai perhitungan dengan nilai ekspeimen terpaut perbedaan 5 %. Hasil ini sudah cukup baik dan dapat digunakan untuk *review* parameter keselamatan secara periodik. Parameter neutronik teras RSG-GAS yang dihitung sudah sesuai dan tidak ada yang melanggar batas keselamatan operasi reaktor. Parameter yang menjadi batas keselamatan adalah kondisi *stuck rod*, *shut down* margin dan

reaktivitas lebih teras harus sesuai dengan nilai reaktivitas batang kendali.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. T. SURBAKTI, S. PINEM, T. M. SEMBIRING, "Analisis Pengaruh Densitas Bahan Bakar Silisida Terhadap Parameter Kinetik Teras Reaktor RSG-GAS", Jurnal Penelitian Fisika dan Aplikasinya. Vol. 3 no. 1, pp. 19-30. 2013.
- [2]. S. PINEM, S. JATI, T. SURBAKTI, T. M. SEMBIRING, "Optimization of Radioisotope Production at RSG-GAS

- Reactor Using Deterministic Method”, *Teknologi Indonesia*, Vol. 35, pp. 37–45, 2016.
- [3]. Pinem S., Sembiring T.M., Surbakti T. Core conversion design study of TRIGA mark 2000 bandung using MTR plate type fuel element. *Int. J. Nucl. Energy Sci. Technol.* Vol. 12, no. 3, pp. 222–238. 2018.
- [4]. S. PINEM, P. H. LIEM, T. M. SEMBIRING, T. SURBAKTI, “Fuel element burn-up measurements for the equilibrium LEU silicide RSG GAS (MPR-30) core under a new fuel management strategy”, *Ann. Nucl. Energy*, Vol. 98, 2016.
- [5]. SETIYANTO, T. SURBAKTI, “Analysis of Gamma Heating at Triga Mark Reactor Core Bandung using Plate Type Fuel”, *Jurnal Tri Dasa Mega*. Vol. 18. no. 3, pp. 127-134. 2016.
- [6]. ROKHMADI, T. SURBAKTI, “Efek Densitas Bahan Bakar Terhadap Parameter Koefisien Reaktivitas Teras RRI”, *Jurnal Tri Dasa Mega*. Vol. 15 no. 2, pp. 77-89. 2013.
- [7]. L. SUPARLINA L, T. SURBAKTI, “Analisis Pola Manajemen Bahan Bakar Desain Teras Reaktor Riset Tipe MTR”, *Jurnal Tri Dasa Mega*. Vol. 14. no. 3, pp. 89-99. 2014.
- [8]. T. SURBAKTI T, S. PINEM, T. M. SEMBIRING, L. SUPARLINA, J. SUSILO, “Desain Konseptual Teras Reaktor Riset Inovatif Berbahan Bakar Uranium-molibdenum dari Aspek Neutronik”, *Jurnal Tri Dasa Mega*. Vol. 3 no.14, pp. 178-191. 2012.
- [9]. T SURBAKTI, P PURWADI, “Karakteristik reaktivitas teras kerja RSG-GAS selama 30 tahun beroperasi”, *Jurnal Penelitian Fisika dan Aplikasinya (JPFA)*. Vol. 7 no.1, pp. 13-26. 2017.
- [10]. P. H. LIEM, T SURBAKTI, D HARTANTO, “Kinetics parameters evaluation on the first core of the RSG GAS (MPR-30) using continuous energy Monte Carlo method”, *Progress in Nuclear Energy*. Vol. 109, pp. 196-203. 2018.
- [11]. T SURBAKTI, M IMRON, “Fuel burn-up calculation for working core of the RSG-GAS research reactor at BATAN Serpong”, *Jurnal Penelitian Fisika dan Aplikasinya (JPFA)*. Vol. 7, no. 2, pp. 89-101. 2017.
- [12]. T SURBAKTI, S PINEM, T. M. SEMBIRING, A HAMZAH, K NABESHIMA, “Calculation of Control Rods Reactivity Worth of RSG-GAS First Core Using Deterministic and Monte Carlo Methods”, *Atom Indonesia* Vol. 45 no. 2, pp. 69-79. 2019.
- [13]. T SURBAKTI, P PURWADI, “Analysis of Neutronic Safety

- Parameters of the Multi-Purpose Reactor–Gerrit Augustinus Siwabessy (RSG-GAS) Research Reactor at Serpong”, *Jurnal Penelitian Fisika dan Aplikasinya (JPFA)*. Vol. 9, no. 1, pp. 78-91. 2019.
- [14]. SURBAKTI T., PINEM S., SEMBIRING T.M., SUBEKTI M., SUNARYO G.R. Preliminary study for alternative conceptual core design of the MTR research reactor. *J. Phys. Conf. Ser.* 2018. 962(1)
- [15]. Surbakti T., Pinem S., Sembiring T.M., Hamzah A., Nabeshima K. Calculation of control rods reactivity worth of RSG-GAS first core using deterministic and Monte Carlo methods. *Atom Indones.* Vol. 45, no. 2, pp. 69–79. 2019.