
ANALISIS NEUTRONIK TERAS RSG-GAS BERBAHAN BAKAR SILISIDA 4,8 G U/CC

Lily Suparlina
Pusat Pengembangan Teknologi Reaktor Riset - BATAN

ABSTRAK

ANALISIS NEUTRONIK TERAS RSG-GAS BERBAHAN BAKAR SILISIDA 4,8 G U/cc. Dengan telah digunakannya bahan bakar silisida 2,96 g/cc di teras RSG-GAS dan telah dilakukannya penelitian mengenai penggunaan bahan bakar silisida 4,8 g/cc, maka perlu dilanjutkan studi mengenai kemungkinan penggunaan bahan bakar silisida dengan teras yang lebih sederhana. Pada penelitian ini dilakukan perhitungan dan analisis parameter neutronik teras RSG-GAS sebelum diaplikasikan ke dalam teras RSG-GAS. Perhitungan dilakukan untuk 2 jenis konfigurasi teras. Teras setimbang dengan CIP terdiri dari 24 buah bahan bakar standar, 8 buah elemen kendali dengan 4 kelas fraksi bakar dan teras setimbang tanpa CIP terdiri dari 32 bahan bakar standar, 8 elemen kendali dengan 8 kelas fraksi bakar. Tampang lintang makroskopik sel bahan bakar sebagai masukan dalam perhitungan teras dilakukan dengan paket program perhitungan sel WIMS/D4 dan perhitungan teras dilakukan dengan paket program difusi 2 dimensi Batan-EQUIL2D. Hasil perhitungan teras menunjukkan bahwa teras RSG-GAS berbahan bakar silisida 4,8 g U/cc dengan CIP merupakan teras alternatif terbaik. Hal ini dikarenakan meskipun memiliki jumlah bahan bakar relatif sedikit, akan tetapi waktu siklus operasinya (1000 MWD) lebih besar 67 % dibanding teras silisida saat ini (600 MWD) dan memiliki fluks neutron termal sebesar $2,45 \times 10^{14}$ neutron/cm².det yang lebih besar 20 % dari teras saat ini walau daya nominalnya 30 % lebih rendah.

kata kunci: silisida 4,8 g U/cc, fraksi bakar, reaktivitas, fluks neutron, teras setimbang

ABSTRACT

NEUTRONIC ANALYSIS OF 4.8 G U/cc SILICIDE RSG-GAS CORE. Having operation experience with the the usage of silicide 2.96 g U/cc in the RSG-GAS core and previous study of highest density silicide core, a further study on the possibility of 4,8 g U/cc density silicide application for simple cores should be continued. In this research, the neutronic parameter calculation and analysis has been carried out. The calculation was done for 2 core configuration types. Equilibrium core with CIP consists of 24 standard fuel elements, 8 control elements in 4 burn-up classes and the equilibrium core without CIP consists of 32 standard fuel elements, 8 control elements in 8 burn-up classes. The fuel cell macroscopic cross-section as the input for core calculation were performed using cell calculation code WIMS/D4 and the core calculation were performed using 2-D diffusion code Batan-EQUIL2D. The analyses results showed that the RSG-GAS silicide 4.8 g U/cc core with CIP is the best alternative core. It is due to although it consists of less fuel elements, but the operation cycle length (1000 MWD) is greater 67 % compared to the present silicide core (600 MWD) and it's thermal neutron flux of $2,45 \times 10^{14}$ neutron/cm².sec is greater 20 % than the present core although the nominal power is 30 % lower.

Keywords : silicide 4,8 g U/cc, burnup fraction, reactivity, neutron flux, equilibrium core.

PENDAHULUAN

Bahan bakar silisida (U_3Si_2-Al) merupakan bahan bakar yang banyak digunakan dalam operasi reaktor riset jenis MTR saat ini. Densitas uranium maksimum bahan bakar silisida yang telah dikualifikasikan adalah sebesar 4.8 g U/cc. [1] Keunggulan bahan bakar jenis ini dibanding dengan bahan bakar oksida (U_3O_8-Al) adalah :

- memiliki densitas uranium dalam *meat* yang relatif tinggi
- memiliki kompatibilitas dengan aluminium dan pendingin
- memiliki konduktivitas yang relatif baik
- memiliki batas *blister* yang baik (515 °C)
- watak *swelling* yang stabil selama iradiasi
- memiliki ketahanan yang tinggi terhadap gas hasil belah

Saat ini reaktor RSG-GAS menggunakan bahan bakar silisida pengganti oksida dengan densitas uranium sebesar 2,96 g U/cc. Penelitian sebelumnya [2] menyimpulkan bahwa penggunaan bahan bakar silisida dengan densitas 4,8 g U/cc dapat diterapkan pada RSG-GAS dengan konfigurasi teras 40 bahan bakar, 8 elemen kendali ditambah 2 batang kendali pengamanan. (BKP) AgInCd, pada posisi B-3 dan G-10. Dengan konfigurasi teras tersebut, reaktor dapat dioperasikan dengan panjang siklus 1400 MWd.

Untuk mendapatkan konfigurasi teras yang optimum , maka dilakukan penelitian lanjutan mengenai pembentukan teras silisida 4,8 g U/cc sebagai teras alternatif dari teras yang digunakan pada saat ini. Tujuan penelitian ini adalah untuk mendapatkan konfigurasi teras RSG-GAS berbahan bakar silisida 4,8 g U/cc yang optimum dengan pengurangan bahan bakar.

Perhitungan dilakukan dalam 2 (dua) tahap, pertama perhitungan sel untuk menggenerasi tampang lintang material teras dengan menggunakan program WIMSD/4 [4] dan kedua adalah perhitungan teras dengan metode difusi 2 dimensi Batan-EQUIL2D [5]. Kajian yang dilakukan dalam perhitungan teras ini hanya ditinjau dari aspek neutroniknya saja. Program konversi teras RSG-GAS harus menghasilkan desain teras silisida setimbang yang optimal. Pada penelitian ini, dilakukan perhitungan untuk 2 jenis teras setimbang yaitu teras A dan B dengan panjang siklus yang bervariasi. Teras A terdiri dari 24 elemen bakar standar dan 8 elemen kendali yang dibagi dalam 4 kelas fraksi bakar, sedangkan teras B terdiri dari 32 elemen bakar standar dan 8 elemen kendali dan

dibagi dalam 8 kelas fraksi bakar. Pencarian teras setimbang dilakukan dengan melakukan perhitungan teras yang menggunakan paket program Batan-EQUIL.

METODE PERHITUNGAN

Batasan Keselamatan

Sebelum melakukan perhitungan teras RSG-GAS, maka terlebih dahulu perlu dipilih batasan desain dan batasan keselamatan yang digunakan dalam perhitungan teras. Batasan desain yang dipilih adalah seluruh konfigurasi teras dan elemen penyusun teras tidak berubah, baik posisi dan jumlahnya. Batasan keselamatan yang digunakan adalah:

- Batasan reaktivitas lebih pada awal siklus dingin bebas xenon sekitar 10 % $\Delta k/k$
- Marjin reaktivitas padam minimum (*stuck rod condition*) adalah -0,5 % $\Delta k/k$.
- Faktor puncak daya (FPD) radial maksimum adalah 1,4.
- Reaktivitas lebih EOC dengan xenon 2 % $\Delta k/k$

Perhitungan Sel

Sebelum dilakukan perhitungan teras, maka terlebih dahulu disiapkan konstanta kelompok difusi dengan paket program WIMS-D4 [6]. Paket program ini menyiapkan konstanta kelompok dalam 4 kelompok tenaga neutron. Konstanta kelompok yang disiapkan merupakan fungsi kondisi reaktor (panas, dingin, xenon setimbang dan tanpa xenon). Hal ini dibuat agar dapat dilakukan perhitungan kesetimbangan reaktivitas teras RSG-GAS.

Perhitungan Teras

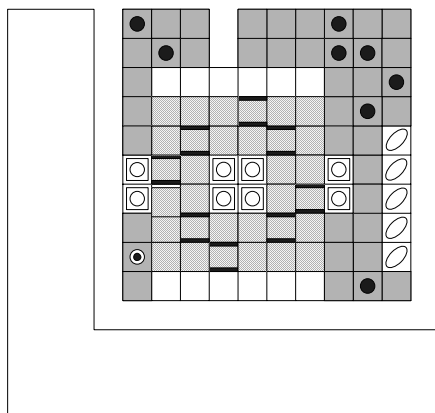
Perhitungan teras dilakukan dengan paket program manajemen teras Batan-EQUIL [5]. Metode yang digunakan dalam paket program ini adalah metode difusi neutron banyak kelompok dengan geometri dua dimensi.

Dalam perhitungan, teras RSG-GAS dimodelkan dalam geometri X-Y. Gambar 1 dan 2 menunjukkan konfigurasi teras A dan B yang digunakan dalam perhitungan teras.

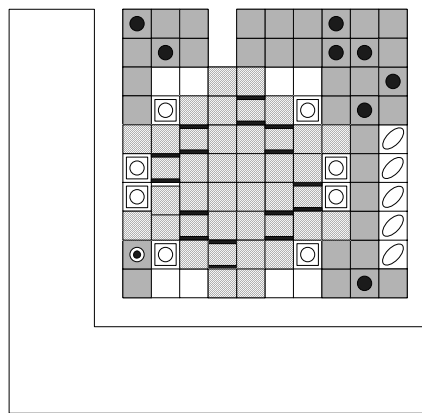
Parameter neutronik yang dihitung adalah :

- Harga reaktivitas lebih teras pada saat awal siklus (*BOC*) dingin bebas xenon

- Harga reaktivitas lebih teras pada akhir siklus (*EOC*) kondisi panas dengan xenon
- Margin padam pada awal siklus saat BOC
- Fraksi bakar buang maksimum
- PPF radial maksimum
- Harga fluks neutron pada posisi iradiasi

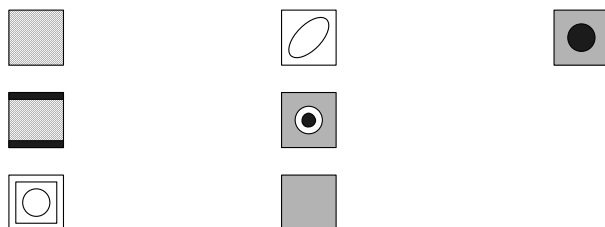


setimbang dengan CIP



Gambar 2. Konfigurasi teras setimbang tanpa CIP

Keterangan :



Teras setimbang dengan CIP terdiri dari 24 elemen bakar standar, 8 elemen kendali dan 8 buah posisi iradiasi dengan pusat iradiasi terletak di tengah teras dan di bagi dalam 4 kelas fraksi bakar dengan pola 6/2, yaitu terjadi penggantian 6 elemen bakar standar dan 2 elemen kendali yang mempunyai fraksi bakar buang maksimum dengan elemen bakar segar dalam tiap siklusnya.

Teras setimbang tanpa CIP, terdiri dari 32 elemen bakar standar dan 8 elemen kendali dengan 8 buah posisi iradiasi yang terletak di teras bagian luar. Fraksi bakar teras dibagi ke dalam 8 kelas, dengan pola 4/1 yang berarti 4 buah elemen bakar standar dan 1 elemen kendali yang sudah mencapai fraksi bakar buang maksimum diganti

dengan yang segar. Tabel 1 dan 2 menunjukkan susunan strategi pergeseran bahan bakar untuk teras setimbang dengan CIP dan tanpa CIP.

Tabel 1. Strategi Pergeseran Bahan Bakar pada Teras Setimbang dengan CIP

Posisi		Posisi		Posisi	
Dari	ke	Dari	ke	Dari	ke
G-9	Keluar	F-4	F-6	C-7	G-9
G-8	G-7	E-9	G-6	C-6	Keluar
G-7	B-9	E-8	E-5	C-5	D-4
G-6	Keluar	E-5	Keluar	C-4	B-8
G-5	G-4	E-4	B-5	B-9	F-7
G-4	D-8	D-9	C-9	B-8	C-7
F-9	F-4	D-8	Keluar	B-7	Keluar
F-8	E-9	D-5	B-4	B-6	G-5
F-7	Keluar	D-4	B-7	B-5	D-5
F-6	C-6	C-9	E-8	B-4	Keluar
F-5	F-8	C-8	C-9	-	-

Tabel 2. Strategi Pergeseran Bahan Bakar pada Teras Setimbang tanpa CIP

Posisi		Posisi		Posisi	
Dari	ke	Dari	ke	Dari	ke
G-10	F-9	E-9	G-6	C-8	F-5
G-8	A-3	E-8	D-6	C-7	E-8
G-7	G-3	E-7	Keluar	C-6	E-5
G-6	B-7	E-6	Keluar	C-5	D-4
G-5	F-10	E-5	D-7	C-4	F-6
G-3	C-9	E-4	F-4	C-3	B-6
F-10	G-7	D-9	C-4	B-10	F-3
F-9	C-7	D-8	E-7	B-8	C-3
F-8	C-5	D-7	Keluar	B-7	Keluar
F-7	D-8	D-6	Keluar	B-6	G-10
F-6	D-5	D-5	E-6	B-5	B-10
F-5	F-8	D-4	E-9	B-3	C-10
F-4	F-7	C-10	E-4		
F-3	D-9	C-9	C-6		

HASIL DAN PEMBAHASAN

Parameter neutronik yang penting sebagai fungsi panjang siklus, yakni reaktivitas lebih teras awal siklus (kondisi dingin bebas xenon), reaktivitas lebih teras akhir siklus (kondisi panas dan xenon setimbang), dan fraksi bakar buang maksimum elemen bakar

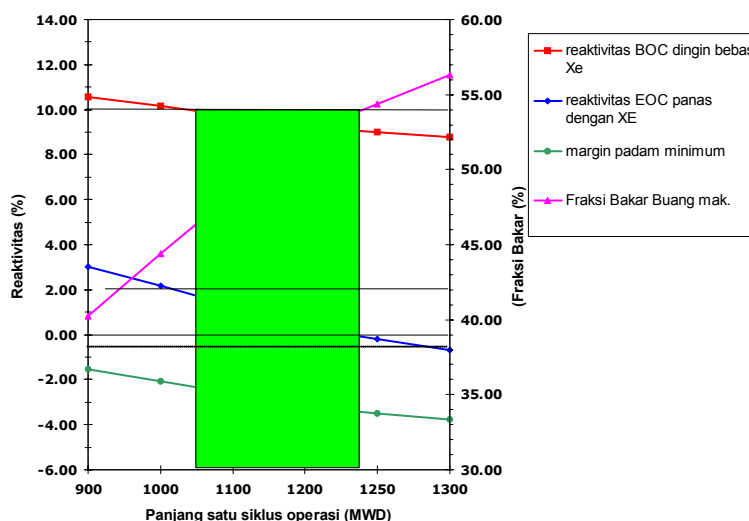
dan elemen kendali. Reaktivitas lebih teras akhir siklus dibatasi nilai reaktivitas lebih yang cukup untuk pengaturan daya reaktor untuk mengkompensasi pemasukan target iradiasi dan pembangkitan xenon.

Hasil perhitungan neutronik teras setimbang silisida 4,8 g U/cc dengan CIP ditunjukkan pada Tabel 3 dan Gambar 3 sedangkan untuk Teras setimbang silisida 4,8 g U/cc tanpa CIP ditunjukkan pada Tabel 4 dan Gambar 4. Daya yang digunakan pada perhitungan teras adalah daya nominal untuk masing-masing teras yaitu 20 MW untuk teras setimbang dengan CIP dan 25 MW untuk teras setimbang tanpa CIP dengan panjang siklus yang bervariasi.

Tabel 3. Parameter Neutronik Teras Setimbang Silisida 4,8 g U/cc dengan CIP

Panjang Siklus ^{*1} (MWD)	ρ_{ex} BOC ^{*2} (%)	ρ_{ex} EOC ^{*3} (%)	ρ_{psr} ^{*4} (%)	PPF ^{*5}	Fraksi bakar buang maks (%)	Fluks neutron termal (10^{14} n/cm ²) ^{*6}
900	10,57	3,00	-1,55	1,24	40,22	2,43
1000	10,15	2,17	-2,07	1,23	40,37	2,45
1100	9,70	1,26	-2,62	1,23	48,43	2,46
1200	9,24	0,31	-3,19	1,22	52,41	2,48
1250	9,00	-0,18	-3,48	1,22	54,40	2,49
1300	8,75	-0,69	-3,79	1,22	56,30	2,49

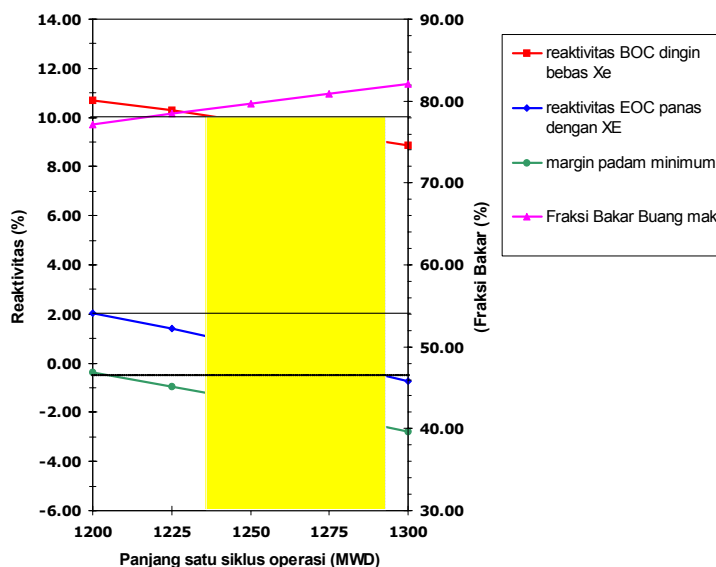
Keterangan: *1 = Dengan operasi penuh 20 MWth; *2 = reaktivitas lebih awal siklus tanpa xenon *3 = reaktivitas lebih akhir siklus dengan xenon, *4 = margin reaktivitas padam kondisi *one stuck tod*, *5 PPF rad maksimum, *6 Fluks neutron rerata maksimum



Gambar 3. Neraca Reaktivitas Teras Setimbang Silisida 4,8 g U/cc dengan CIP

Panjang Siklus ^{*1} (MWD)	ρ_{ex} BOC ^{*2} (%)	ρ_{ex} EOC ^{*3} (%)	ρ_{psr} ^{*4} (%)	PPF ^{*5}	Fraksi bakar buang maks (%)	Fluks neutron termal (10^{14} n/cm ²) ^{*6}
1200	10,71	2,0	-0,38	1,39	76,74	1,63
1225	10,28	1,39	-0,94	1,40	78,45	1,65
1250	9,82	0,71	-1,53	1,41	79,23	1,66
1275	9,35	0,01	-2,13	1,43	80,90	1,67
1300	8,85	-0,73	-2,78	1,44	81,65	1,69

Keterangan: *1 = Daya operasi nominal 25 MWth; *2 = reaktivitas lebih awal siklus tanpa xenon *3 = reaktivitas lebih akhir siklus dengan xenon, *4 = margin reaktivitas padam kondisi *one stuck tod*, *5 PPF rad maksimum, *6 Fluks neutron rerata maksimum



Gambar 4. Neraca Reaktivitas Teras Setimbang Silisida 4,8 g U/cc tanpa CIP

Parameter neutronik yang penting sebagai fungsi panjang siklus, yakni reaktivitas lebih teras awal siklus (kondisi dingin bebas xenon), reaktivitas lebih teras akhir siklus (kondisi panas dan xenon setimbang), dan fraksi bakar buang maksimum elemen bakar dan elemen kendali. Reaktivitas lebih teras akhir siklus dibatasi nilai reaktivitas lebih yang cukup untuk pengaturan daya reaktor untuk mengkompensasi pemasukan target iradiasi dan pembangkitan xenon.

Dari Tabel 3 dan Gambar 3 dapat dilihat bahwa untuk teras setimbang tanpa CIP, jika batasan reaktivitas lebih pada awal siklus kondisi dingin bebas xenon adalah 10 % $\Delta k/k$ dan reaktivitas lebih akhir siklus dengan xenon ≥ 2 %, maka panjang siklus yang memenuhi kriteria tersebut adalah jika reaktor dioperasikan sekitar 50 hari dengan nilai reaktivitas lebih teras awal siklus adalah 10,03 % $\Delta k/k$ setara dengan 1000 MWd.

Namun bila batasan reaktivitas lebih awal siklus tersebut lebih dari 10 % $\Delta k/k$, maka reaktor dapat dioperasikan dengan panjang siklus mulai dari 900 MWd. Reaktor dapat dioperasikan dengan panjang siklus sampai 1230 MWd tanpa penyediaan reaktivitas untuk eksperimen, dimana reaktivitas akhir siklus dengan xenon adalah nol, Nilai marjin padam minimum dan Faktor Puncak Daya (*Power Peaking Factor = PPF*) nya, dimana nilai marjin padam lebih negatif dari -0,5 % dan PPF di bawah 1,4 yaitu berkisar antara 1,22 – 1,24.

Dari Tabel 4 dan Gambar 4 terlihat bahwa untuk mendapatkan harga reaktivitas awal siklus dibawah 10 % $\Delta k/k$ maka panjang siklus operasi untuk teras setimbang adalah mulai 1250 MWd. Pada panjang siklus 1200 MWd, reaktivitas lebih awal siklus yang dihasilkan adalah 10,71 % $\Delta k/k$, reaktivitas lebih akhir siklus di atas 2 % $\Delta k/k$, tetapi reaktivitas padam dengan kondisi satu batang kendali gagal masuk (*stuck rod*) kurang dari 0,5 % $\Delta k/k$ yaitu -0,16 % $\Delta k/k$. Ini berarti pada kondisi tersebut reaktor tidak dapat dipadamkan bila satu batang kendali gagal masuk. Pada panjang siklus 1225 MWd, reaktivitas lebih awal siklus yang dihasilkan adalah 10,28 %, reaktivitas lebih akhir siklus 1,39 % $\Delta k/k$, reaktivitas padam dengan kondisi satu batang kendali gagal masuk (*stuck rod*) lebih negatif dari -0,5 % $\Delta k/k$ yaitu -0,94 % $\Delta k/k$ dan memenuhi batas kriteria keselamatan. Jika menginginkan reaktivitas lebih teras awal siklus lebih besar dari 10 % $\Delta k/k$, maka desain teras setimbang silisida 4,8 g U/cc tanpa CIP yang dapat digunakan bila dioperasikan mulai 49 hari pada daya nominal 25 MW atau setara dengan 1225-1275 MWd. Namun nilai PPF radial yang didapat antara 1,39 - 1,43 ini berarti pembangkitan panas di teras besar melebihi batasan desain 1,4 . Fraksi bakar buang maksimum antara 74 – 82 % yang berarti melebihi juga fraksi bakar buang maksimum yang ditetapkan di awal.

Dibandingkan dengan teras yang lainnya, nilai PPF radial teras setimbang dengan CIP adalah paling kecil yaitu sekitar 1.22–1,24. Nilai tersebut berada dalam batasan yang ditentukan yaitu kurang dari 1,4. Begitu pula dengan nilai fluks rerata maksimum yang tersedia. Teras setimbang dengan CIP mempunyai harga fluks neutron termal di CIP yang paling besar yaitu antara 2,43 – 2,49 ($\times 10^{14}$ n/cm².det) pada daya nominal 20 MW dan harga fluks neutron termal terendah adalah 1,44 ($\times 10^{14}$ n/cm²). Harga fluks teras setimbang tanpa CIP secara keseluruhan ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 5. Parameter Neutronik Teras Silisida 4,8 U/cc teras setimbang dengan CIP, tanpa CIP dan dengan BKP

PARAMETER	Teras setimbang dengan CIP	Teras setimbang tanpa CIP	Teras setimbang dengan CIP d
Daya operasi nominal (MW)	20	25	30
Panjang siklus operasi reaktor (MWD/hari)	1000/50	1250/50	1400/46,6
Fraksi bakar rerata BOC (%)	14,46	36,27	34,23
Fraksi bakar rerata EOC (%)	24,71	45,74	43,07
Fraksi bakar buang maksimum (%)	56,30	79,23	75,42
Reaktivitas teras lebih BOC dingin bebas xenon (%)	10,15	10,03	10,65
Reaktivitas lebih teras EOC panas xenon setimbang (%)	2,17	6,84	2,37
Margin reaktivitas padam minimum (%)	-2,07	-1,27	-3,02
PPF radial maksimum	1,23	1,41	1,31
Fluks neutron ($\times 10^{14}$ /cm-2.s) CIP/IP 8 posisi			
Fluks neutron termal rerata maksimum	2,45	1,66	2.32

Tabel 6. Harga fluks neutron termal pada teras setimbang dengan CIP pada posisi iradiasi pada daya operasi nominal 20 MW.

Panjang siklus (MWd)	ϕ neutron termal rerata ($\times 10^{14}$ n/cm ² .det)	ϕ neutron termal maksimum ($\times 10^{14}$ n/cm ² .det)
900	1,95	2,43
1000	1,96	2,45
1100	1,97	2,46
1200	1,99	2,48
1250	1,99	2,49
1300	1,99	2,49

Dengan memperhatikan Tabel 6, dapat dilihat bahwa teras setimbang silisida 4,8 g U/cc dengan CIP yang terdiri dari 24 bahan bakar standar dan 8 bahan bakar kendali serta 8 posisi iradiasi, mampu memberikan harga fluks yang besar di posisi iradiasi dengan fluks tertinggi di posisi iradiasi pusat (CIP – E7), meskipun daya nominalnya adalah 20 MW.

KESIMPULAN

Hasil perhitungan teras menunjukkan bahwa teras RSG-GAS berbahan bakar silisida 4,8 g U/cc dengan CIP yang terdiri 24 elemen bakar standar dan 8 elemen kendali adalah merupakan teras alternatif terbaik. Hal ini dikarenakan :

-
- Walau memiliki jumlah bahan bakar relatif sedikit, akan tetapi waktu siklus operasinya (1000 MWD) lebih besar 67 % dibanding teras silisida saat ini (600 MWD).
 - Memiliki fluks neutron termal sebesar $2,45 \times 10^{14}$ neutron/cm².det yang lebih besar 20 % dari teras saat ini walau daya nominalnya 30 % lebih rendah.
 - Tersedianya posisi iradiasi dalam teras yang jauh lebih banyak dibanding teras saat ini akibat berkurangnya bahan bakar dalam teras.

DAFTAR PUSTAKA

1. A. Languille, J.P. Durand dan A. Gay, “New High Density MTR Fuel The CEA-CERCA-COGEMA Development Program”, Transaction of The 2nd Topical Meeting on RRFM Bruges, Belgia 1998.
2. Lily Suparlina, *dkk.*, “Manajemen Teras RSG-GAS Berbahan Bakar Silisida 4,5 dan 4,8 g U/cc ”, Jurnal Sains dan Teknologi Nuklir Indonesia , Vol 4. Edisi Khusus 4, Agustus 2003.
3. Iman Kuntoro dan Tagor Malem Sembiring., “Kemampuan Batang Kendali Berbahan Penyerap B4C Pada Teras Silisida RSG-GAS”, Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir Tri dasa Mega, Volume 3, Nomor 2, Juni 2001.
4. Liem P.H., “Development Of An In-Core Fuel Management Code For Searching The Equilibrium Core In 2-D Reactor Geometry (Batan-EQUIL-2D)”, Atom Indonesia **23**, 2 (1997).