

MANAJEMEN TERAS RSG-GAS BERBAHAN BAKAR SILISIDA 4,5 DAN 4,8 G U/CC

Lily Suparlina dan Tagor Malem Sembiring
Pusat Pengembangan Teknologi Reaktor Riset - BATAN

ABSTRAK

MANAJEMEN TERAS RSG-GAS BERBAHAN BAKAR SILISIDA 4,5 DAN 4,8 G U/CC. Dengan telah digunakannya bahan bakar silisida 2,96 g/cc di teras RSG-GAS dan telah dilakukannya beberapa penelitian mengenai penggunaan bahan bakar silisida 3,55 g/cc, studi mengenai kemungkinan penggunaan bahan bakar silisida dengan densitas yang lebih tinggi perlu dilanjutkan. Densitas uranium maksimum bahan bakar silisida yang telah terqualifikasi adalah sebesar 4,8 g U/cc. Penelitian sebelumnya menyimpulkan bahwa penggunaan bahan bakar silisida dengan densitas 3,55 g U/cc dapat menaikkan panjang siklus sebesar 7 (tujuh) hari daya penuh (210 MWD) dengan tanpa mengubah material dan konfigurasi teras. Namun akan terjadi penurunan margin padam sebesar 50 % dibanding dengan desain awal. Dengan demikian penggunaan bahan bakar silisida dengan densitas uranium lebih besar dari 3,55 g U/cc di teras RSG-GAS harus menambahkan batang kendali pengaman (BKP). Penelitian yang dilakukan ialah untuk mendapatkan teras setimbang RSG-GAS silisida berdensitas 4,5 dan 4,8 g U/cc. Perhitungan sel menggunakan paket program WIMS/D4 dan perhitungan teras menggunakan paket perhitungan difusi 2 dimensi BATAN-EQUIL-2D. Perhitungan teras dilakukan untuk kondisi teras setimbang tanpa dan dengan BKP. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa teras tanpa BKP tidak dapat dioperasikan, akan tetapi dengan menambahkan BKP, pada posisi B-3 dan G-10, reaktor dapat dioperasikan dengan panjang siklus antara 1200-1270 MWD dan 1400 MWD masing-masing untuk teras silisida 4,5 dan 4,8 g U/cc.

Kata kunci: densitas ,uranium, RSG - GAS, silisida, batang kendali pengaman.

ABSTRACT

THE RSG-GAS CORE MANAGEMENT WITH 4.5 AND 4.8 G U/CC SILICIDE FUEL. Having operation experience with the usage of silicide 2.06 g U/cc in the RSG-GAS core completion of study using highest density silicide 3.55 g U/cc, a further study on the possibility of higher density silicide application should be continued. The qualified maximum silicide meat density is 4.8 g U/cc. The previous study concluded that the utilization of silicide at 3.55 g U/cc could expand the

operation cycle length until 7 full power days (210MWD) without any core configuration changes. Nevertheless, the shutdown margin decreased about 50 % compared to the original design. So that, there should be two safety rods (SR) installed to the 3,55 g U/cc silicide core. The objective of this work is to achieve an equilibrium 4.5 and 4.8 g U/cc silicide core. The cell and core calculation was performed by WIMS/D-4 and 2 dimension code BATAN-EQUIL-2D, respectively. The calculation showed that core without SR can not be operated safely, but with the installed SR in B-3 and G-10 core grid positions the reactor can be operated at the operation cycle length in the range of 1200-1270 MWD and 1400 MWD for the equilibrium 4.5 and 4.8 g U/cc silicide core, respectively.

Key words: density, uranium, RSG – GAS, silicide, safety rods.

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 3,55 g U/cc dapat menaikkan panjang siklus sebesar 7 (tujuh) hari daya penuh (210 MWD) dengan tanpa mengubah material dan konfigurasi teras.

Jika digunakan bahan bakar silisida 3,55 g U/cc di teras RSG-GAS maka terjadi penurunan margin reaktivitas padam menjadi 1,03 % $\Delta k/k$. Jika nilai ini dibanding dengan nilai desain awal sebesar 2,2 % $\Delta k/k$, maka terjadi penurunan yang signifikan sebesar 50 %. Oleh karena itu, jika digunakan densitas uranium yang lebih tinggi dari 3,55 g U/cc di teras RSG-GAS maka akan terjadi penurunan margin reaktivitas padam yang mengakibatkan syarat keselamatan dilanggar.

Dengan demikian penggunaan bahan bakar silisida dengan densitas uranium lebih besar dari 3,55 g U/cc di teras RSG-GAS harus mengubah konfigurasi teras, salah satunya adalah dengan menambah batang kendali seperti yang dilakukan oleh peneliti sebelumnya [3]. Saat ini reaktor RSG-GAS menggunakan uranium silisida (U_3Si_2Al) 2,96 g U/cc sebagai bahan bakar. Efek penambahan 2 buah batang kendali adalah menaikkan margin reaktivitas padam dari 1.03 % $\Delta k/k$ menjadi 2,54 % $\Delta k/k$. Oleh karena itu pada penelitian ini akan dikaji penggunaan bahan bakar silisida 4,5 dan 4,8 g U/cc di teras RSG-GAS dengan dan tanpa penambahan batang kendali. Tujuan penelitian ini adalah untuk mendapatkan densitas uranium maksimum yang dapat digunakan di teras RSG-GAS dengan dan tanpa batang kendali pengaman (BKP).

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-EQUIL-2D [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, pencarian teras setimbang dilakukan dengan mengacu pada pola pergantian bahan bakar teras RSG-GAS saat ini yaitu pola 5/1. Dengan pola tersebut, 5 buah elemen bakar standar (EB) dan 1 buah elemen bakar kendali (EK) akan dikeluarkan dan dimasukkan masing-masing

pada akhir siklus dan awal siklus teras baru. Perhitungan teras dilakukan untuk daya maksimum 30 MW dengan variasi lama operasi 20,30,40,50 dan 60 hari.

TEORI

Persamaan penyusutan bahan bakar

Densitas nuklida dalam teras sebagai fungsi posisi (r) dan waktu (t) dapat digambarkan sebagai vektor densitas nuklida $N(r,t)=[N_1(r,t),N_2(r,t),\dots,N_K(r,t)]^T$, dimana k menyatakan indeks nuklida dan jumlah nuklida adalah K . Tanda pangkat T menunjukkan pemindahan dari suatu matriks. Densitas nuklida sebagai fungsi waktu dapat dinyatakan sebagai persamaan diferensial linear orde satu

$$\frac{\delta}{\delta t} N(r,t) = T(\Phi, \sigma, \lambda) N(r,t) \quad (1)$$

dimana ϕ , σ dan λ masing-masing adalah fluks neutron (fungsi energi dan posisi), penampang lintang serapan atau tangkapan dan konstanta peluruhan. Matriks T biasanya merupakan transmutasi matriks nuklida.

Persamaan kritikalitas reaktor

Distribusi fluks neutron yang digunakan dalam persamaan penyusutan bahan bakar. Persamaan (1) ditentukan melalui persamaan kritikalitas

$$M(N)\Phi = \frac{1}{k_{eff}} F(N)\Phi \quad (2)$$

sedangkan nilai fluks neutron absolut didapat dengan menormalisasikan daya reaktor. Operator M adalah migrasi neutron dan operator yang hilang sedangkan operator F adalah operator produksi neutron. K_{eff} menyatakan factor multiplikasi, yang merupakan *eigenvalue* dari persamaan di atas.

Pemuatan dan pergeseran bahan bakar di teras

Selama pemuatan dan pergeseran bahan bakar, flux neutron diabaikan, hanya dipusatkan pada notasi matriks

$$N^{j+1}(r,0) = S^j N^j(r, \tau) + N_{im}^{j+1}(r, 0) \quad (3)$$

Dalam persamaan di atas, j dan τ masing-masing menunjukkan indeks dan panjang siklus teras. $N^{j+1}(r,0)$ merupakan vektor densitas nuklida pada awal siklus untuk siklus teras berikutnya. Dapat diamati bahwa hasil pemuatan dan pergeseran bahan bakar merupakan densitas fungsi waktu yang tidak kontinu. Vektor $N^j(r,\tau)$ menggambarkan densitas nuklida di akhir siklus, dan $N^j(r,0)$ menunjukkan densitas nuklida di awal siklus j . Matriks S^j biasanya disebut sebagai matriks pergeseran, dan dengan menggunakan matriks tersebut dapat dibuat strategi pemuatan dan pergeseran bahan bakar. Vektor N_{im}^{j+1} menunjukkan komposisi bahan bakar segar yang dimasukkan ke dalam teras pada awal siklus.

Formula matematis untuk kondisi teras setimbang

$$\begin{aligned} N^{j+1}(r,t) &= N^j(r,t) && 0 \leq t \leq \tau \\ S_{j+1} &= S_j && \text{semua } j \\ N_{im}^{j+1}(r,0) &= N_{im}^j(r,0) && \text{semua } j \end{aligned} \quad (4)$$

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 $10\% \Delta k/k$
- 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 $2\% \Delta k/k$

Jika syarat batas di atas tidak terpenuhi, maka dilakukan perubahan konfigurasi teras dengan mengeluarkan dua buah reflector dari posisi B-3 dan G-10. Posisi tersebut diganti dengan penambahan 2 buah batang kendali di posisi B-3 dan G-10. Selanjutnya dilakukan perhitungan kembali untuk mengetahui apakah batasan keselamatan yang telah ditetapkan di atas terpenuhi atau tidak.

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) dan massa ^{235}U (4,5 dan 4,8 g/cc). Hal ini dibuat agar dapat dilakukan perhitungan kesetimbangan reaktivitas teras RSG-GAS.

Perhitungan Teras

Perhitungan teras dilakukan dengan bantuan paket program manajemen teras BATAN-EQUIL-2D [5]. Metode yang digunakan dalam paket program ini adalah metode difusi neutron banyak kelompok dengan geometri dua dimensi.

Dalam perhitungan teras, teras RSG-GAS dimodelkan dalam geometri X-Y seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 1. Salah satu masukan yang terpenting dalam

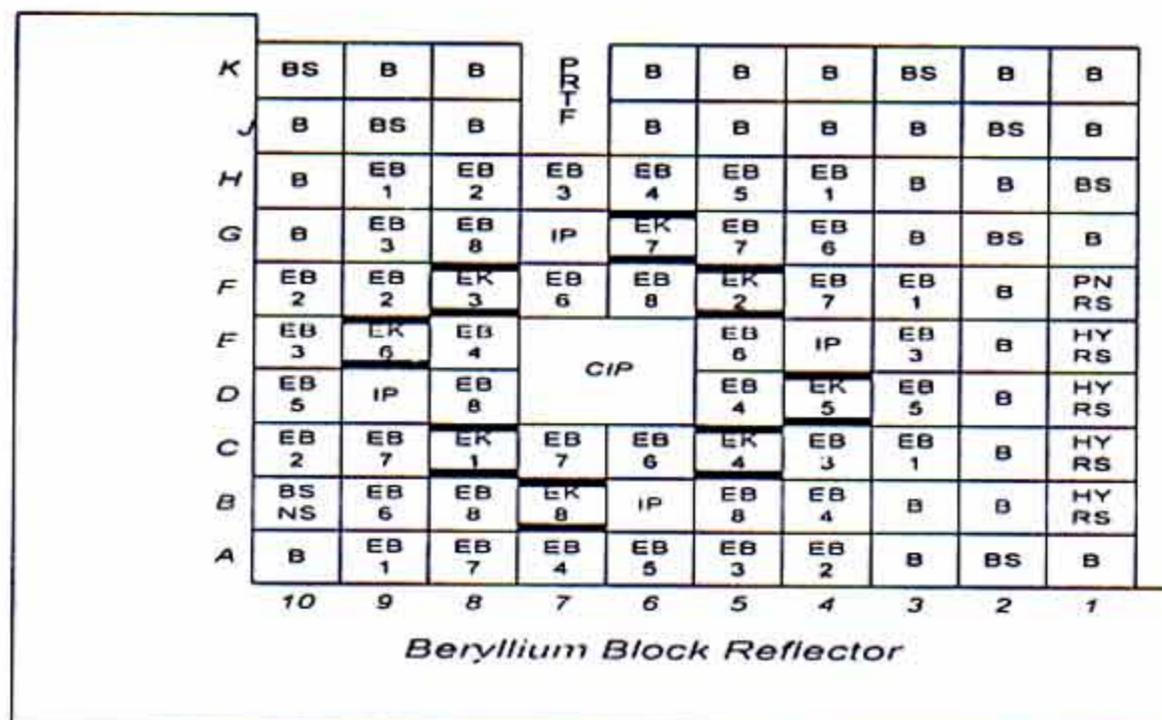
program BATAN-EQUIL-2D ialah pola pergeseran bahan bakar. 40 buah elemen bakar dan elemen kendali dikelompokkan ke dalam 8 kelas fraksi bakar. Akibatnya pada awal siklus 5 buah elemen bakar dan 1 elemen kendali dimuatkan sesuai dengan jumlah elemen bakar bekas dengan fraksi bakar maksimum yang dikeluarkan dari teras. Pola pergeseran bahan bakar dan pembagian 8 kelas fraksi bakar dalam teras masing-masing ditunjukkan dalam Tabel 1 dan Gambar 1. Seluruh teras menggunakan pola manajemen bahan bakar ini sampai terbentuknya teras setimbang silisida 4,5 dan 4,8 g U/cc.

Dalam penelitian ini, perhitungan teras dilakukan dengan variasi waktu operasi 20, 30, 40, 50 dan 60 jam dengan menggunakan nilai buckling $1,7290E-03$ dan $1,7260E-03$ masing-masing untuk silisida 4,5 dan 4,8 g U/cc. Hal ini dimaksudkan untuk mendapatkan parameter neutronik sebagai fungsi dari waktu operasi. 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

Tabel 1. Pola pengeluaran dan pergeseran elemen bakar di setiap siklus reaktor RSG-GAS dengan Pola 5/1

Dari	Ke	Dari	Ke	Dari	Ke
H-9	F-10	F-5	F-8	C-7	B-8
H-8	C-4	F-4	F-6	C-6	G-5
H-7	F-7	F-3	C-10	C-5	D-4
H-6	D-10	E-10	B-4	C-4	D-5
H-5	E-5	E-9	G-6	C-3	H-8
H-4	F-9	E-8	D-3	B-9	C-9
G-9	E-8	E-5	A-8	B-8	keluar
G-8	keluar	E-3	A-7	B-7	keluar
G-6	B-7	D-10	G-4	B-5	keluar
G-5	G-8	D-8	keluar	B-4	A-6
G-4	C-7	D-5	H-5	A-9	A-4
F-10	G-9	D-4	E-9	A-8	B-5
F-9	A-5	D-3	C-6	A-7	H-7
F-8	C-5	C-10	E-3	A-6	B-9
F-7	F-4	C-9	D-8	A-5	H-6
F-6	keluar	C-8	F-5	A-4	E-10



Keterangan:

EB = Elemen Bakar Standar; EK = Elemen Bakar Kendali; BE = Elemen Reflektor Berilium; BS = Elemen Reflektor Berilium dengan Plug; IP = Posisi Iradiasi; CIP = Posisi Iradiasi Tengah; PNRS = Pneumatic Rabbit System; HYRS = Hydraulic Rabbit System.

Gambar 1. Konfigurasi teras RSG-GAS (angka dalam grid menunjukkan kelas fraksi bakar)

HASIL DAN PEMBAHASAN

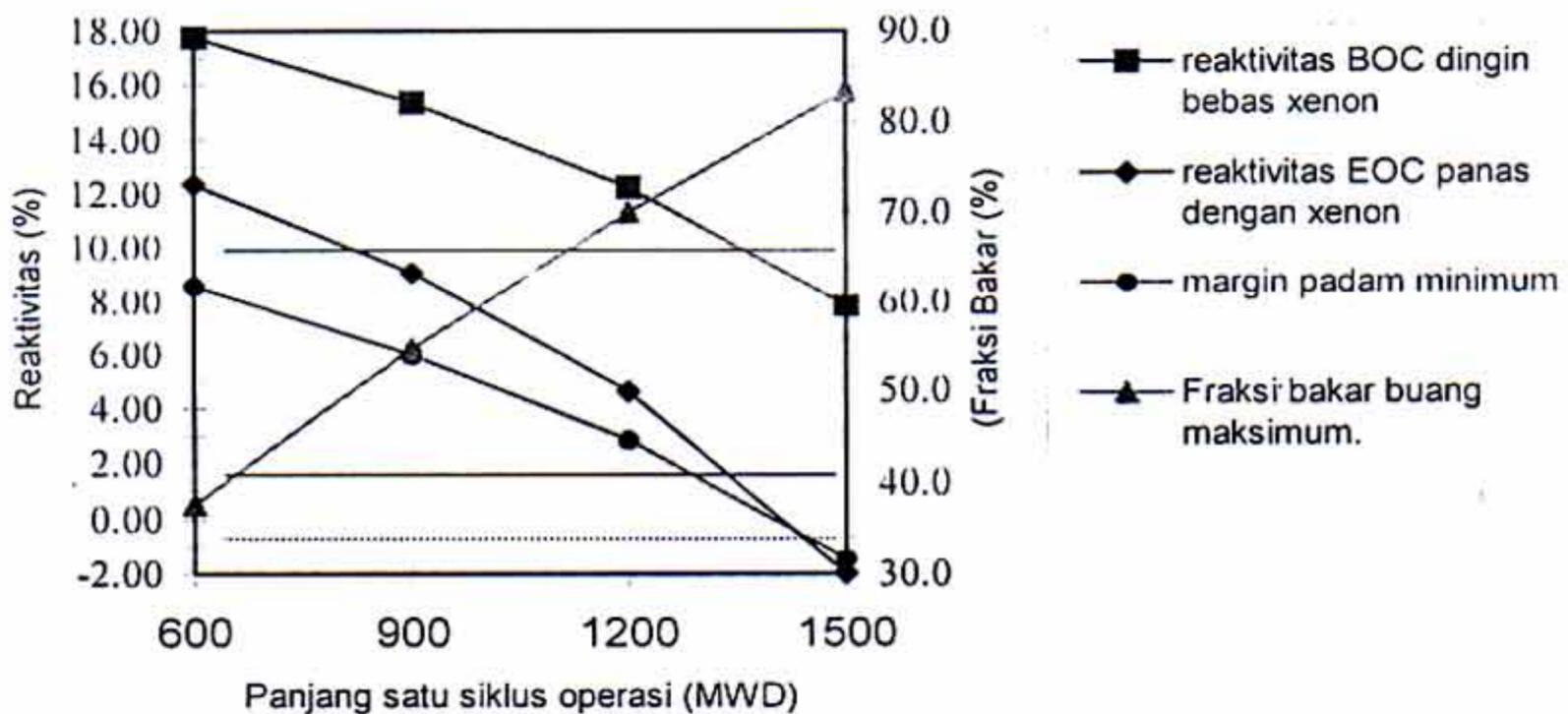
Perhitungan teras silisida tanpa BKP

Perhitungan teras silisida sesuai dengan konfigurasi teras pada Gambar 1 (tanpa penambahan batang kendali pengaman (BKP) dilakukan untuk silisida dengan densitas 4,5 dan 4,8 g U/cc). Hasil perhitungan berupa parameter neutronik teras silisida 4,5 g U/cc ditunjukkan pada Tabel 2 dan Gambar 2 sedangkan untuk teras silisida 4,8 g U/cc ditunjukkan pada Tabel 3 dan Gambar 3.

Tabel 2. Parameter neutronik teras silisida 4.5 g U/cc tanpa BKP

Waktu operasi (hari)	Panjang Siklus ^{*1} (MWD)	ρ_{ex} BOC ^{*2} (%)	ρ_{ex} EOC ^{*3} (%)	ρ_{psr} ^{*4} (%)	PPF radial maksimum ^{*5}
20	600	17,78	12,38	8,57	1,20
30	900	15,37	9,06	6,01	1,20
40	1200	12,25	4,63	2,86	1,24
50	1500	7,82	-1,96	-1,43	1,39

Keterangan: *1 = Dengan operasi penuh 30 MWth; *2 = reaktivitas lebih awal siklus tanpa xenon *3 = reaktivitas lebih akhir siklus dengan xenon, *4 = margin reaktivitas padam kondisi *one stuck rod*, *5 PPF rad maksimum

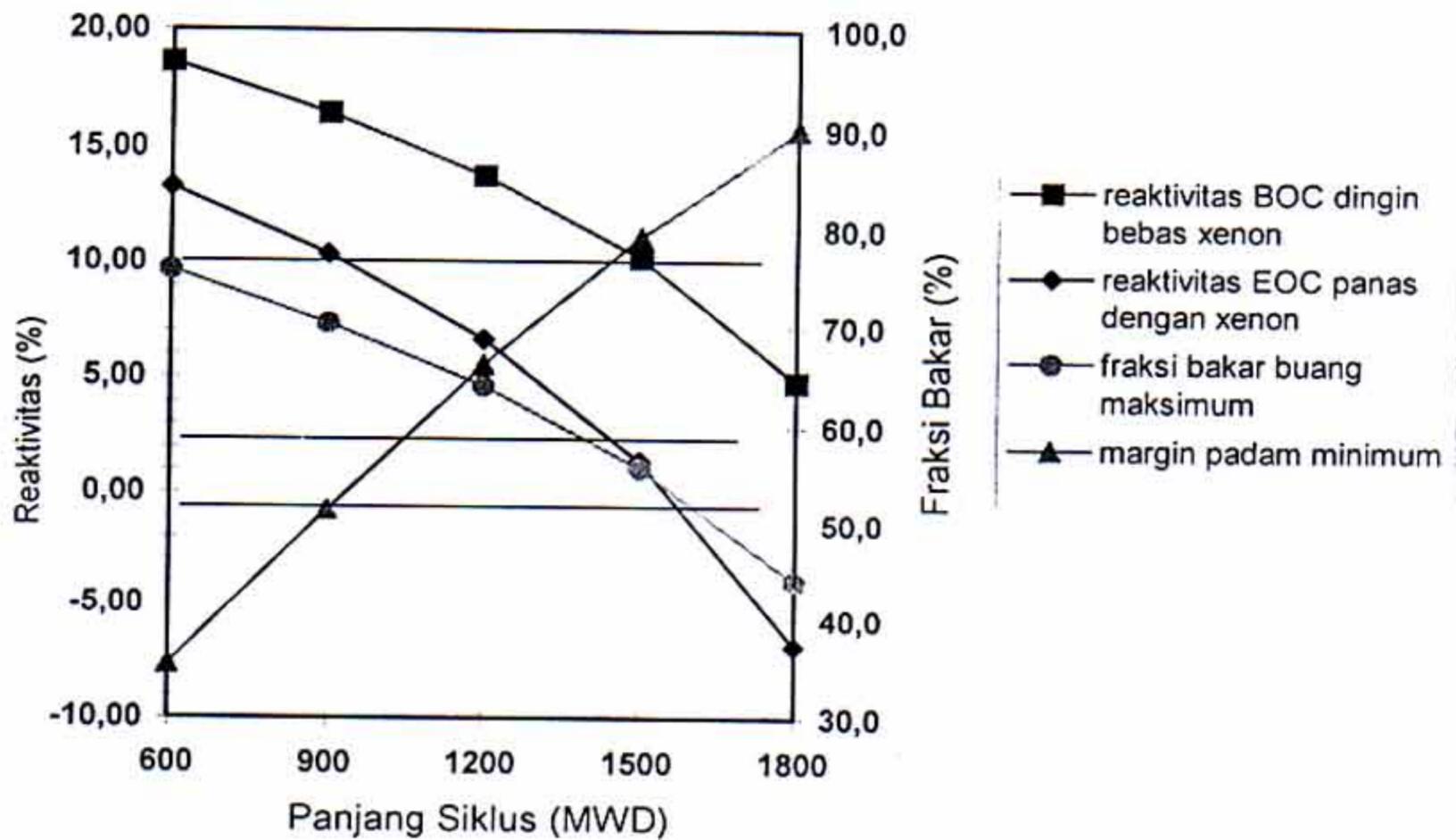


Gambar 2. Neraca reaktivitas teras silisida 4,5 g U/cc tanpa BKP

Tabel 3. Parameter neutronik teras silisida 4,8 g U/cc tanpa BKP

Waktu operasi (hari)	Panjang Siklus ^{*1} (MWD)	ρ_{ex} BOC ^{*2} (%)	ρ_{ex} EOC ^{*3} (%)	ρ_{psr} ^{*4} (%)	PPF radial maksimum ^{*5}
20	600	18,62	13,31	9,57	1,21
30	900	16,47	10,38	7,34	1,20
40	1200	13,81	6,64	4,63	1,23
50	1500	10,22	1,39	1,10	1.32

Keterangan: *1 = Dengan operasi penuh 30 MWth; *2 = reaktivitas lebih awal siklus tanpa xenon *3 = reaktivitas lebih akhir siklus dengan xenon, *4 = margin reaktivitas padam kondisi *one stuck rod*. *5 PPF rad maksimum



Gambar 3. Neraca reaktivitas teras silisida 4,8 g U/cc tanpa BKP

Gambar 2 dan 3 masing-masing untuk teras silisida 4,5 dan 4,8 g U/cc menunjukkan grafik 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. Sebaliknya pada saat awal siklus, reaktivitas lebih teras dibatasi oleh kondisi subkritikal satu batang kendali gagal masuk (*one stuck-rod condition*). Untuk memilih panjang siklus operasi optimal untuk densitas tertentu dari daerah yang memungkinkan, perlu dilakukan beberapa perlakuan. Untuk panjang siklus yang lebih pendek, harga reaktivitas EOC yang tersedia menjadi lebih besar, tetapi reaktivitas margin untuk satu batang kendali gagal berkurang. Dari Gambar 2 terlihat bahwa bila menggunakan batasan reaktivitas lebih teras di awal siklus 10 % dan nilai reaktivitas lebih teras akhir siklus 2 % akan terpenuhi untuk waktu operasi reaktor 1350 hari, namun batasan margin padam minimum pada awal siklus -0,5 % tidak terpenuhi karena harga yang didapatkan memberikan harga yang positif. Ini berarti kriteria keselamatan bahwa reaktor harus dapat dipadamkan pada saat kondisi satu batang kendali gagal masuk (*stuck rod*) tidak terpenuhi. Harga reaktivitas padam kondisi *stuck rod* akan terpenuhi untuk waktu operasi 1500 MWD, tetapi parameter yang lain yaitu reaktivitas lebih pada akhir siklus tidak terpenuhi. Dengan demikian silsida 4,5 g U/cc dengan konfigurasi teras tersebut tidak dapat diaplikasikan.

Seperti halnya dengan silisida 4,5 g U/cc, batasan kriteria keselamatan yang telah ditetapkan juga tidak dapat terpenuhi oleh teras silisida 4,8 g U/cc yang ditunjukkan Tabel 3 dan Gambar 3

Perhitungan teras silisida dengan BKP

Karena kedua jenis bahan bakar di atas belum memenuhi keselamatan operasi reaktor, maka dilakukan perhitungan selanjutnya yaitu dengan menambahkan batang kendali pengaman AgInCd di posisi teras B-3 dan G-10. Perhitungan teras dilakukan untuk kedua jenis bahan bakar silisida 4,5 g U/cc dan 4,8 g U/cc.

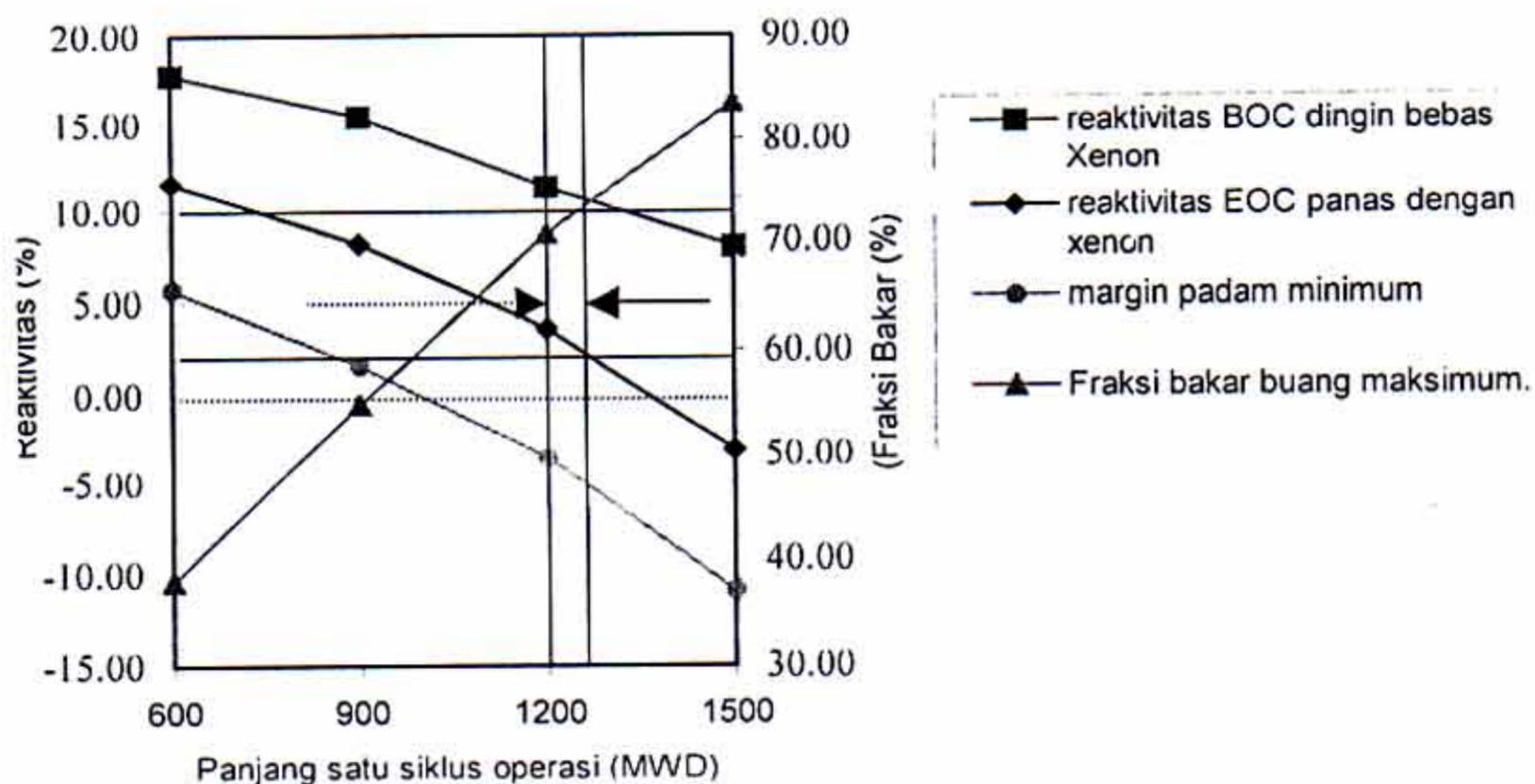
Tabel 4 dan Gambar 4 menunjukkan harga parameter neutronik hasil perhitungan teras silisida 4,5 g U/cc. Dari Tabel 4 terlihat bahwa parameter neutronik yang dihasilkan memenuhi batasan keselamatan yang telah ditetapkan. Dari Data yang ditunjukkan pada Tabel 4, terlihat bahwa teras silisida ini mulai dapat digunakan dengan waktu operasi mulai dari 40 hari atau 1200 MWD. Parameter neutronik yang dihasilkan menunjukkan bahwa batasan keselamatan yang ditetapkan seperti harga margin padam minimum $-0,5\%$, reaktivitas lebih pada akhir siklus 2% terpenuhi, meskipun harga reaktivitas lebih pada awal siklus lebih tinggi dari 10% yaitu $11,35\%$. Hal ini disebabkan karena massa uranium dari bahan bakar segar pada awal siklus yang dimasukkan ke dalam teras silisida 4,5 g U/cc lebih besar daripada teras silisida 2,96 g U/cc. Dengan memperhatikan grafik yang ditunjukkan oleh Gambar 4, maka dapat dilihat bahwa daerah waktu operasi yang dapat digunakan untuk teras silisida 4,5 g U/cc ialah antara 1200 MWD – 1270 MWD.

Tabel 4. Parameter neutronik teras silisida 4,5 g U/cc dengan BKP

Waktu operasi (hari)	Panjang siklus ^{*1} (MWD)	ρ_{ex}^{*2} BOC (%)	ρ_{ex}^{*3} EOC (%)	ρ_{psr}^{*4} (%)	^{*5} PPF radial maksimum
20	600	17,82	11,55	5,72	1,23
30	900	15,44	8,16	1,64	1,25
40	1200	11,35	3,63	-3,47	1,29
50	1500	8,01	-3,07	-10,94	1,36

Keterangan:

- *1 = Dengan operasi penuh 30 MWth; *2 = reaktivitas lebih awal siklus tanpa xenon
- *3 = reaktivitas lebih akhir siklus dengan xenon, *4 = margin reaktivitas padam kondisi *one stuck rod*, *5 PPF radial maksimum



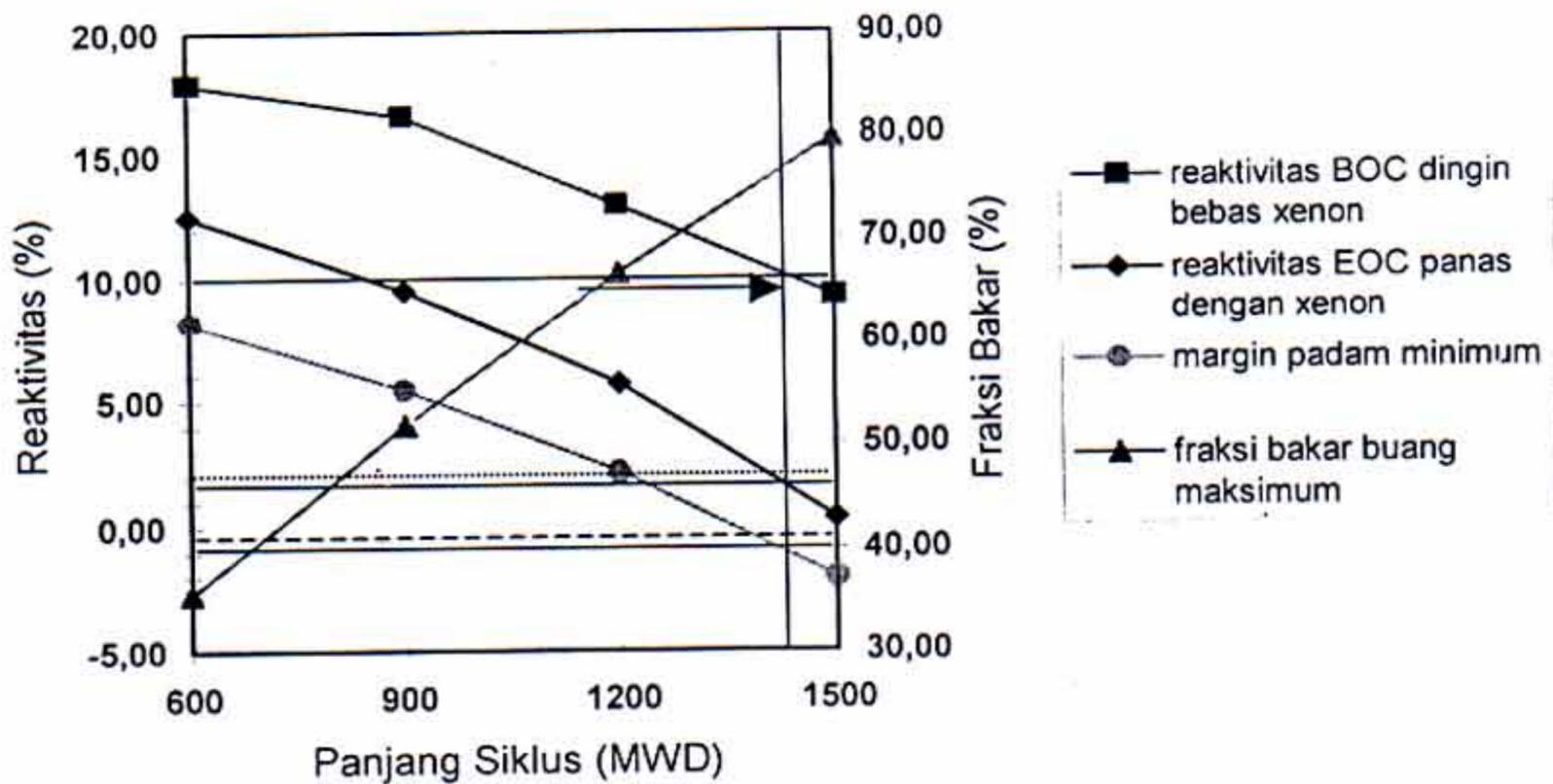
Gambar 4. Neraca reaktivitas teras silisida 4,5 g U/c dengan BKP

Tabel 5 dan Gambar 5 menunjukkan harga parameter neutronik untuk teras silisida 4,8 g U/cc dengan BKP. Dari grafik yang ditunjukkan oleh Gambar 5 dapat ditentukan bahwa batasan keselamatan akan terpenuhi bila teras silisida 4,8 g /cc dioperasikan dengan panjang siklus 1400 MWD atau 46, 6 hari.

Tabel 5. Parameter neutronik teras silisida 4,8 g U/cc dengan BKP

Waktu operasi (hari)	Panjang siklus ^{*1} (MWD)	ρ_{ex}^{*2} BOC (%)	ρ_{ex} EOC ^{*3} (%)	ρ_{psr}^{*4} (%)	^{*5} PPF radial maksimum
20	600	17,87	12,51	8,17	1,24
30	900	16,53	9,52	5,43	1,24
40	1200	12,95	5,69	2,21	1,27
50	1500	9,28	0,35	-2,02	1,33

Keterangan: *1 = Dengan operasi penuh 30 MWth; *2 = reaktivitas lebih awal siklus tanpa xenon *3 = reaktivitas lebih akhir siklus dengan xenon, *4 = margin reaktivitas padam kondisi *one stuck rod*, *5 PPF radial maksimum



Gambar 5. Neraca reaktivitas teras silisida 4,8 g U/c dengan BKP

Tabel 6. Parameter Neutronik Teras Silisida 2,96 , 3,55 dan 4,5 dan 4,8 g U/cc

PARAMETER	Si 2,96 g U/cc	Si 3,55 g U/cc	Si 4,5 g U/cc	Si 4,8 g U/cc
Panjang siklus operasi reactor (MWD/hari)	615/20,50	960	1270/42,3	1400/46,6
Fraksi bakar rerata BOC (%)	30,30	29,46	33,08	34,23
Fraksi bakar rerata EOC (%)	51,78	37,21	41,68	43,07
Fraksi bakar buang maksimum (%)	56,00	66,48	73,57	75,42
Reaktivitas teras lebih BOC dingin bebas xenon (%)	9,65	9,24	10,45	10,65
Reaktivitas lebih teras EOC panas xenon setimbang (%)	2,86	2,85	2,33	2,37
Margin reaktivitas padam minimum (%)	-1,30	-3,89	-3,33	-3,02
PPF radial maksimum	1,23	1,25	1,31	1,31
Fluks neutron ($\times 10^{14} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) CIP/IP 8 posisi				
Fluks neutron termal rerata	2,3023	2,3214	2,1937	2,1860
Fluks neutron termal maksimum	2,5107	2,5462	2,4540	2,4430
Fluks neutron cepat rerata	2,0660	2,1028	2,1369	2,1360

Dengan memperhatikan Tabel 6, dapat dilihat bahwa harga parameter neutronik lainnya seperti jumlah uranium yang terbuang dalam satu siklus (step fraksi bakar), fluks neutron dan PPF radial juga memenuhi batas keselamatan. Makin besar densitas uranium dalam bahan bakar silisida, makin besar fraksi bakar rerata baik di awal siklus (BOC) maupun pada akhir siklus (EOC), dengan step fraksi bakar sekitar 8 %.

Harga PPF maksimum baik untuk teras silisida 4,5 g U/cc maupun silisida 4,8 g U/cc kurang dari 1,4. Harga fluks pada Tabel 6 menunjukkan bahwa ada penurunan harga fluks termal yang relatif kecil dan kenaikan fluks neutron cepat yang juga kecil dibandingkan dengan teras silisida 2,96 g U/cc atau 3,55 g U/cc yaitu sekitar 9 % untuk fluks neutron termal dan 3 % untuk fluks neutron cepat.

KESIMPULAN

Bila komposisi dan konfigurasi teras dipertahankan seperti kondisi teras saat ini, maka kedua jenis densitas bahan bakar silisida 4,5 g U/cc dan 4,8 g U/cc tidak dapat digunakan pada teras RSG-GAS, karena tidak memenuhi kriteria keselamatan.

Dengan menambahkan batang kendali pengaman (BKP) AgInCd, pada posisi B-3 dan G-10, teras silisida 4,5 U/cc dapat dioperasikan dengan panjang siklus antara 1200-1270 MWD dan 1400 MWD untuk teras silisida 4,8 g U/cc.

DAFTAR PUSTAKA

1. LANGUILLE, A., DURAND, J.P., GAY, A., New high density MTR fuel the CEA-CERCA-COGEMA development program. Transaction of The 2nd Topical Meeting on RRFM Bruges, Belgia 1998.