

KARAKTERISTIK REAKTIVITAS TERAS SILISIDA RSG-GAS

Tukiran S, Tagor S, Surian P

Pusbang Teknologi Reaktor Riset - BATAN

ABSTRAK

KARAKTERISTIK REAKTIVITAS TERAS SILISIDA RSG-GAS. Tujuan program konversi teras RSG-GAS menggunakan bahan bakar silisida adalah memperpanjang waktu siklus operasi sehingga dapat meningkatkan keandalan dan utilisasi reaktor. Dibanding dengan desain awal yang menggunakan bahan bakar oksida $2,96 \text{ gUcm}^{-3}$, teras setimbang silisida $2,96 \text{ gU cm}^{-3}$ memiliki keandalan yang lebih baik. Teras setimbang silisida ini direncanakan melalui dua tahap konversi teras menggunakan teras campuran. Tahap pertama adalah konversi dari oksida ke silisida dengan kerapatan $2,96 \text{ gUcm}^{-3}$. Tahap kedua adalah konversi teras silisida dengan muatan yang lebih tinggi. Oleh karena itu, tujuan penelitian ini adalah mendapatkan karakteristik teras RSG-GAS yang unjuk kerjanya tidak mengurangi kriteria keselamatan dan kemampuan utilisasi selama konversi teras. Dalam penelitian ini, strategi manajemen bahan bakar di dalam teras silisida sama seperti digunakan pada teras oksida yaitu pola 5/1 (5 elemen bakar satu elemen kendali). Desain teras dilakukan dengan kombinasi paket program WIMS-D/4 dan paket program difusi neutron Batan-EQUIL-2D. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa karakteristik teras oksida dan silisida memiliki kesesuaian tidak ada parameter yang melanggar batas keselamatan.

ABSTRACT

REACTIVITY CHARACTERISTIC OF SILICIDE FUELS OF THE RSG-GAS CORE. The objective of core conversion program in the RSG-GAS reactor using silicide fuel is to increase the operation cycle length to meet the higher reactor availability and utilization. Compared to the original design using oxide fuel of 2.96 gU/cc , the equilibrium silicide core of 2.96 gU/cc has the availability higher than oxide core. The silicide core will be achieved through two steps of core conversion using mixed cores. The first step is the core conversion from oxide to silicide fuel in same meat density of 2.96 gU/cc . Then the second step is the core conversion from silicide of 2.96 to higher density. The objective of this present work is to obtain the reactivity characteristic of the RSG-GAS silicide cores which have a performance without decreasing the safety criteria and utilization capabilities during the core conversion. The same in-core fuel management strategy proposed in the previous work is applied in all cores. The core design is carried out by means of the combination of WIMS-D/4 code and diffusion codes of Batan-EQUIL-2D. The calculated results showed that the characteristic of silicide core has good agreement with the oxide core. As long as core conversion, all of the designed cores have indeed core parameters which meet with the safety criteria applied.

PENDAHULUAN

Salah satu kegiatan penelitian yang memiliki prioritas tinggi di Pusat Pengembangan Teknologi Reaktor Riset (P2TRR-Batan) adalah program konversi teras Reaktor Serba Guna G.A.Siwabessy (RSG-GAS) dari bahan bakar oksida (U_3O_8) ke bahan bakar silisida (U_3Si_2) dengan densitas yang sama yaitu $2,96 \text{ gU/cm}^3$ dan hal ini telah selesai dilakukan. Tahap selanjutnya konversi bahan bakar silisida dengan densitas yang lebih tinggi.

Dengan selesainya konversi teras oksida ke silisida pada muatan yang sama maka perlu dianalisis karakteristik reaktivitas terasnya dengan mengevaluasi hasil perhitungan yang dilakukan oleh peneliti sebelumnya⁽¹⁾ dan hasil eksperimen. Sehingga untuk tahap selanjutnya dapat diestimasi

langkah apa yang harus dilakukan dengan konversi bahan bakar silisida densitas yang lebih tinggi.

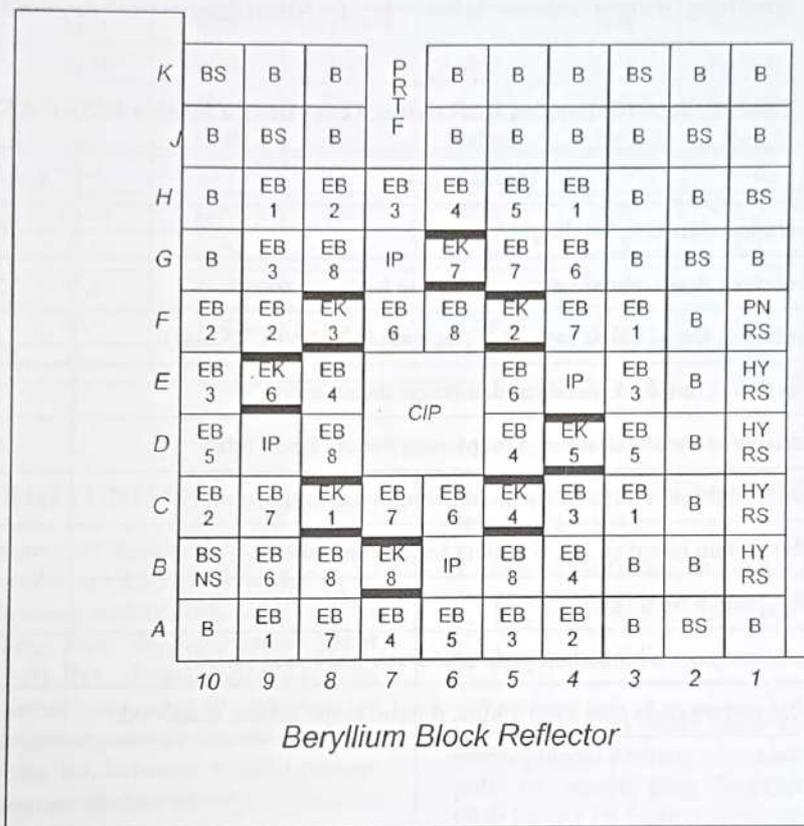
Oleh karena itu, tujuan penelitian ini adalah mendapatkan karakteristik reaktivitas teras RSG-GAS yang unjuk kerjanya tidak mengurangi kriteria keselamatan dan kemampuan utilisasi selama konversi teras. Dalam penelitian ini, strategi manajemen bahan bakar di dalam teras silisida sama seperti digunakan pada teras oksida yaitu pola 5/1 yaitu 5 bahan bakar dan satu elemen kendali dikeluarkan setiap siklus. Desain teras dilakukan dengan kombinasi paket program WIMS-D/4 dan paket program difusi neutron Batan-EQUIL-2D⁽²⁾. Hasil eksperimen teras silisida yang telah berlangsung selama 4 siklus dievaluasi berdasarkan hasil perhitungan.

DESKRIPSI TERAS REAKTOR RSG-GAS

Teras Reaktor RSG-GAS

Teras reaktor RSG-GAS dimoderasi dan didinginkan oleh air ringan (H₂O) secara konveksi paksa dengan arah aliran pendingin dari atas ke bawah. Komponen-komponen teras di susun dalam kisi (grid) 10 × 10 dengan masing-masing kisi ber-

ukuran 81 × 77,1 mm⁽³⁾. Di kisi-kisi ini diletakkan elemen bakar (EB), elemen kendali (EK), elemen berilium dan posisi irradiasi tersebut dikelilingi selubung teras untuk mengarahkan aliran pendingin sehingga dapat melalui komponen-komponen teras. Berilium digunakan sebagai reflektor, dan di luar selubung teras, ditempatkan blok reflektor berilium yang berbentuk "L" seperti yang disajikan pada Gambar 1.



Keterangan: EB = Elemen Bakar Standar; EK = Elemen Bakar kendali; BE = Elemen Reflektor Berilium; BS = Elemen Reflektor Berilium dengan Plug; IP = Posisi Irradiasi; CIP = Posisi Irradiasi Tengah; PNRS = *Pneumatic Rabbit System*; HYRS = *Hydraulic Rabbit System*.

Gambar 1. Konfigurasi Teras Setimbang RSG-GAS.

Teras setimbang reaktor RSG-GAS yang disebut teras kerja (*Typical Working Core, TWC*), terdiri dari 40 elemen bakar standar, 8 elemen bakar kendali dan 8 buah posisi irradiasi dalam teras. Posisi irradiasi dalam teras ini terdiri dari 4 buah IP (*Irradiation Position*) yang menempati 4 buah posisi grid teras. Sedangkan sisanya ditempati oleh elemen reflektor berilium dan 5 buah posisi sistem *rabbit*. Elemen bakar standar yang digunakan adalah tipe MTR (*Material Testing Reactor*) yang terdiri dari

21 pelat bahan bakar yang tersusun atas meat, yang merupakan dispersi uranium dengan aluminium yaitu U₃O₈-Al dengan pengkayaan rendah sebesar 19,75 % U²³⁵ dalam kelongsong AlMg. EK masing-masing terdiri dari 15 pelat bahan bakar yang di kedua sisinya di pakai untuk tempat masuk-keluarnya bilah penyerap (batang kendali) tipe garpu dengan komposisi 80 % Ag, 15 % In dan 5 % Cd. Berat U²³⁵ dalam 1 buah EB adalah sebesar 250 gr dan berat 1 buah EK adalah sebesar 178,6 gr.

Reaktor RSG-GAS tidak dapat dioperasikan secara langsung dengan daya maksimum 30 MW dengan bahan bakar yang seluruhnya baru. Oleh karena itu perlu dilakukan pembentukan teras penuh dilakukan melalui teras-teras antara, sehingga bila reaktor mencapai konfigurasi teras penuh telah terdapat elemen bakar yang dapat memberikan jaminan keamanan selama beroperasi dengan daya penuh.

Neraca reaktivitas reaktor RSG-GAS untuk konfigurasi teras setimbang dengan elemen bakar

oksida (250 gram U^{235} /elemen bakar) dinyatakan dalam Tabel I.

Adapun kriteria batas keselamatan operasi reaktor adalah :⁽⁵⁾

1. Fraksi bakar maksimum adalah 56%.
2. Nilai reaktivitas lebih maksimum adalah 10,9%
3. Nilai reaktivitas lebih pada saat *stuck-rod* $\geq 0,5\%$
4. Nilai faktor puncak daya maksimal adalah 1,4.

Tabel I. Kesetimbangan Reaktivitas Teras Desain Oksida RSG-GAS.⁽⁴⁾

Reaktivitas	($\Delta k/k$), %
Perubahan dari kondisi dingin ke panas	0,3
Perubahan dari kondisi xenon setimbang ke tanpa xenon	3,5
Perubahan fraksi bakar satu siklus operasi (30 MWth, 25 hari)	3,0
Reaktivitas untuk eksperimen dan target dalam teras	2,0
Reaktivitas cadangan untuk kompensasi xenon, beam tube	0,4
Reaktivitas lebih teras (awal siklus, dingin dan tanpa xenon)	9,2
Nilai padam (awal siklus, 8 batang kendali masuk)	-14,5
Nilai padam total (awal siklus)	-5,3
Berkurangnya nilai padam pada saat stuck-rod (awal siklus)	3,1
Nilai padam pada saat awal siklus, dingin, tanpa xenon, stuck-rod.	-2,2

Pola Manajemen Bahan Bakar Reaktor RSG-GAS

Mulai pada tahun 1998 pemuatan bahan bakar reaktor RSG-GAS berpola 6/1 diganti menjadi pola 5/1, yaitu 5 elemen bakar dan 1 elemen kendali akan dikeluarkan pada akhir siklus. Dengan dipakainya strategi ini maka terdapat beberapa keuntungan yaitu, pertama utilisasi elemen bakar menjadi lebih optimal karena seluruh elemen bakar yang dikeluarkan mempunyai fraksi bakar dengan kelas yang sama. Sedangkan pada program pergantian sebelumnya, kelas fraksi bakar dari elemen bakar yang dikeluarkan tidak seragam. Sedangkan keuntungan yang kedua adalah bagi pengelola teras reaktor RSG-GAS, pola ini lebih sederhana di dalam pengelolanya, karena pola

pergantiannya sudah tetap dan teratur (seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 2).

Dengan demikian, reaktivitas lebih teras dan distribusi fluks relatif sama untuk setiap konfigurasi teras setimbang. Keuntungan pola 5/1 yang ketiga adalah dapat dipakai terus untuk rencana pertukaran teras reaktor RSG-GAS berbahan bakar silisida dengan kerapatan uranium yang lebih tinggi dari $2,96 \text{ gU cm}^{-3}$ setiap elemen bakar, baik teras transisi maupun teras setimbang. Akan tetapi, panjang satu siklus teras menjadi relatif pendek jika dibandingkan dengan sebelumnya, yaitu sekitar 550 MWD (dengan pola baru) dan 750 MWD (dengan pola yang lama). Reaktivitas lebih, teras juga menjadi relatif lebih kecil, karena jumlah elemen bakar segar yang dimasukkan menjadi lebih kecil.

Tabel 2. Strategi manajemen elemen bakar teras RSG-GAS.

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

METODE PERHITUNGAN

Untuk menentukan karakteristik reaktivitas teras oksida dan silisida RSG-GAS maka pembentukan teras setimbang reaktor RSG-GAS melalui perhitungan parameter teras dengan bantuan paket program Batan-EQUIL-2D. Batasan operasi reaktor menjadi syarat untuk menentukan diterimanya konfigurasi teras setimbang oksida dan silisida yang diusulkan. Disamping itu, beberapa kondisi reaktor yang tidak mengalami perubahan adalah:

1. Tidak ada modifikasi dalam komponen teras reaktor.
2. Jumlah posisi irradiasi dan unjuk kerjanya harus tetap dipertahankan.

Prosedur Pembentukan Teras Silisida Reaktor RSG-GAS

Sebelum melakukan desain teras campuran oksida dan silisida reaktor RSG-GAS perlu dilakukan desain teras setimbang silisida. Desain teras setimbang silisida dilakukan dengan menggunakan batasan keselamatan operasi dalam kondisi reaktor sebagai batasan desain.

Oleh karena itu, dilakukan juga pencarian teras setimbang oksida sebagai acuan dalam mendesain teras campuran oksida dan silisida untuk mencapai teras setimbang silisida. Ada tiga para-

meter bebas yang digunakan untuk mencari teras setimbang, yaitu :

1. komposisi/kepadatan nuklida elemen bakar segar.
2. pola manajemen bahan bakar baru.
3. panjang siklus teras setimbang.

Pola manajemen bahan bakar yang digunakan dalam mengoptimasi panjang siklus teras setimbang adalah pola 5/1 seperti yang dinyatakan dalam Tabel 2. Oleh karena itu komposisi/kepadatan nuklida elemen bakar segar juga sudah ditetapkan. Dengan demikian yang menjadi parameter bebas dalam optimasi teras setimbang adalah panjang siklus teras.

Langkah Perhitungan

Sebelum melakukan perhitungan parameter teras setimbang dan campuran dengan Batan-EQUIL-2D terlebih dahulu dilakukan penyiapan data masukan (*input*) berupa:

1. Pustaka konstanta kelompok material teras reaktor RSG-GAS. Pustaka yang dipakai dalam perhitungan adalah pustaka material tak dapat belah (70 buah material) dan pustaka material dapat belah. Kedua pustaka ini sudah tersedia dan disusun dalam 4 kelompok tenaga neutron. Batas tenaga tiap kelompok tenaga neutron dinyatakan dalam Tabel 3. Pustaka material

dapat belah terdiri dari kumpulan tampang lintang makroskopis sebagai fungsi suhu (dingin atau panas), fraksi bakar, jenis bahan bakar (oksida dan silisida) dan massa U^{235} (250 gram). Suhu dingin berarti suhu pada saat reaktor tidak beroperasi, dan suhu panas berarti suhu pada saat reaktor dioperasikan 30 MW.

2. Geometri reaktor, dimensi, syarat batas dan daya reaktor
3. Pembagian mesh ke masing-masing sumbu geometri reaktor
4. Kerapatan nuklida atau komposisi elemen bakar segar ($N_{in}(r,0)$)
5. Strategi pergeseran (*reshuffle*) elemen bakar (S^d)
6. Panjang satu siklus operasi (t)
7. Opsi perhitungan untuk kondisi dengan dan tanpa Xenon
8. *Buckling* ke arah aksial
9. Jumlah iterasi dan kriteria konvergensi untuk k_{eff} dan fluks neutron
10. Nilai koefisien kehitaman (*blackness coefficient*) untuk batang kendali AgInCd.

METODE EKSPERIMEN

Setelah pemuatan bahan bakar ke dalam teras RSG-GAS, dilakukan eksperimen daya rendah untuk menentukan posisi batang kendali pada reaktor kritis bebas sumber. Kemudian dilakukan kalibrasi batang kendali dengan metode kompensasi berpasangan. Satu batang kendali berpasangan dengan batang kendali yang lain namun posisinya harus simetris (berseberangan).⁽⁷⁾ Setiap operasi daya tinggi dilakukan pencatatan energi yang dibakar selama operasi sehingga energi total dapat dihitung setiap akhir siklus. Penentuan akhir siklus dilakukan dengan melihat posisi batang kendali *bank* maupun *regulating rod*

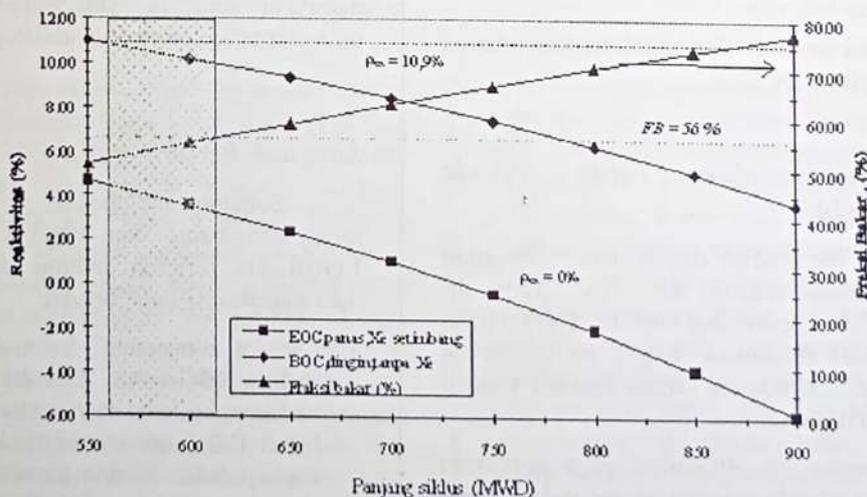
HASIL PERHITUNGAN DAN PEMBAHASAN

Hasil Perhitungan Parameter Teras Setimbang Oksida

Gambar 2 menunjukkan ρ_{ex} teras setimbang oksida pada saat BOC, EOC dan fraksi bakar maksimum sebagai fungsi panjang siklus operasi (MWD).

Tabel 3. Batasan Tenaga Neutron dalam Perhitungan Teras.⁽⁶⁾

Kelompok	Batas Atas (eV)	Batas Bawah (eV)	Nilai Koefisien Kehitaman Ag-In-Cd
1	$1,000 \times 10^7$	$0,831 \times 10^6$	6.0078E-4
2	$0,831 \times 10^6$	$5,553 \times 10^3$	3.8520E-3
3	$5,553 \times 10^3$	0.625	1.0822E-1
4	0,625	0.000	0.42295



Gambar 2. Grafik nilai reaktivitas dan fraksi bakar sebagai fungsi panjang siklus untuk teras setimbang oksida.

Dari Gambar 2 dapat dilihat bahwa untuk panjang siklus 550 MWD (18,33 hari), nilai ρ_{ex} pada saat BOC adalah 11,00 % yang melebihi batas keselamatan sebesar 10,9 %. Sedangkan untuk panjang siklus 650 MWD (21,67 hari), nilai fraksi bakar (FB) maksimumnya adalah 58,86 %, melebihi nilai batas keselamatan yang ditentukan yaitu 56,0 %. Oleh karena itu, daerah yang diarsir di Gambar 2 merupakan daerah optimasi untuk menentukan panjang siklus yang optimal.

Nilai fraksi bakar meningkat dengan naiknya panjang siklus, dan sebaliknya untuk nilai ρ_{ex} di BOC dan EOC berkurang dengan naiknya panjang siklus. Hal ini berarti bahwa margin reaktivitas padam akan semakin besar dengan naiknya panjang siklus.

Oleh karena itu, panjang siklus yang optimal untuk teras setimbang oksida adalah panjang siklus yang memberikan nilai fraksi bakar maksimum sebesar 56 %. Setelah dilakukan perhitungan, maka panjang siklus yang optimal adalah 614,3 MWD (20,47 hari).

Jika teras setimbang oksida dioperasikan, maka distribusi faktor puncak daya (FPD) radial di teras dengan FPD radial maksimum sebesar 1,23 yang terjadi di C-8. Nilai ini masih di bawah batas keselamatan operasi yang diizinkan yaitu 1,40.

Tabel 4 menunjukkan bahwa margin reaktivitas pada saat OSR adalah -0,95 %, yaitu lebih

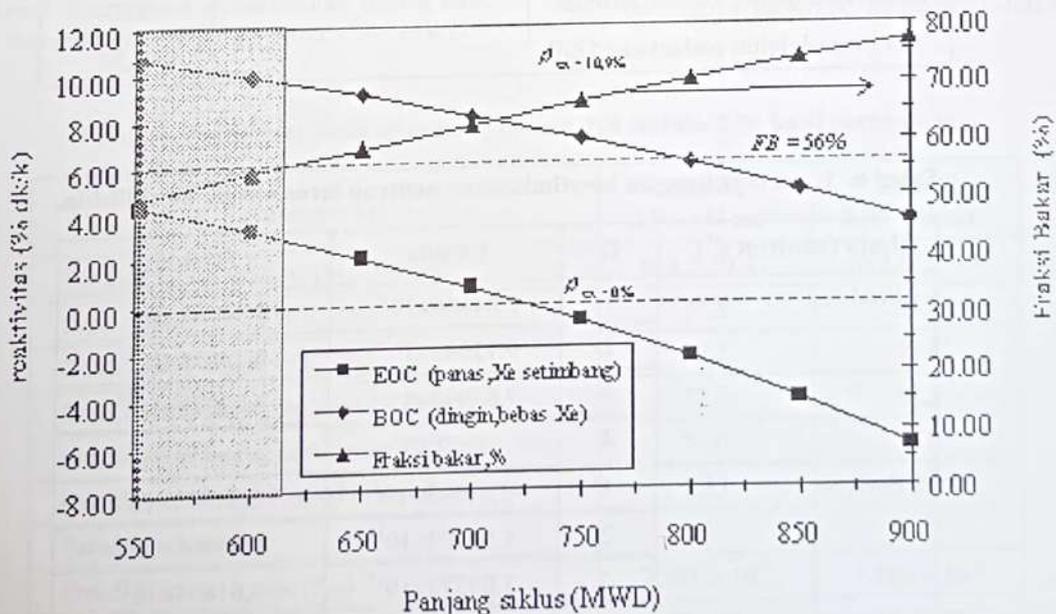
besar dari nilai minimum -0,50 %. Selanjutnya, bahwa elemen kendali di posisi B-7 memiliki fraksi bakar terbesar yaitu 56,00% di akhir siklus.

Tabel 4. Reaktivitas teras setimbang oksida RSG-GAS hasil perhitungan.

Parameter Reaktivitas	% $\Delta k/k$
Perubahan dari kondisi dingin ke panas	0,62
Perubahan dari kondisi xenon setimbang ke tanpa xenon	3,66
Perubahan fraksi bakar satu siklus operasi (30 MW, 20,47 hari)	2,88
Reaktivitas lebih teras	9,96
Nilai total batang kendali	-13,79
Margin reaktivitas padam	-3,83
Nilai batang kendali terbesar	2,88
Margin reaktivitas padam saat OSR	-0,95

Hasil Perhitungan Parameter Teras Setimbang Silisida

Gambar 3 menunjukkan ρ_{ex} teras setimbang silisida pada saat BOC, EOC dan fraksi bakar maksimum sebagai fungsi panjang siklus (MWD).



Gambar.3. Grafik nilai reaktivitas dan fraksi bakar sebagai fungsi panjang siklus untuk teras setimbang silisida.

Dari Gambar 3 terlihat bahwa untuk panjang siklus 550 MWD (18,33 hari), ρ_{ex} pada saat BOC adalah 10,7 % masih di bawah nilai 10,9 %. Sedangkan untuk panjang siklus 650 MWD (21,67 hari), nilai fraksi bakar (FB) maksimumnya adalah 58,83 %, melebihi nilai batas keselamatan yang ditentukan yaitu 56,00 %. Oleh karena itu, sama seperti teras setimbang oksida, panjang siklus operasi optimal teras setimbang silisida ditentukan oleh panjang siklus yang memberikan fraksi bakar maksimum sebesar 56 %. Berdasarkan perhitungan, maka panjang siklus yang optimal untuk teras setimbang silisida adalah 614,6 MWD (20,48 hari).

Faktor puncak daya (FPD) radial maksimum di teras setimbang silisida adalah 1,23 di posisi C-8. Nilai ini masih di bawah batas keselamatan operasi yang diizinkan, yaitu 1,40.

Selanjutnya, Tabel 5 menunjukkan bahwa margin reaktivitas pada saat OSR adalah -1,32 %, yaitu lebih besar dari nilai minimum -0,50 % dan distribusi fraksi bakar maksimum 56 % terjadi di B-7.

Jika dilakukan perbandingan antara teras setimbang oksida dan silisida, maka dengan panjang siklus operasi yang sama, ρ_{ex} teras setimbang oksida lebih besar dari teras setimbang silisida. Hal ini disebabkan karena laju produksi dan serapan neutron dalam teras seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 6 adalah :

- laju produksi neutron di teras oksida relatif lebih besar dari yang terjadi di teras silisida.
- laju serapan neutron di teras oksida relatif lebih kecil dari yang terjadi di teras silisida.

Tabel 5. Reaktivitas teras silisida RSG-GAS hasil perhitungan.

Parameter Reaktivitas	% $\Delta k/k$
Perubahan dari kondisi dingin ke panas	0,62
Perubahan dari kondisi xenon setimbang ke tanpa xenon	3,67
Perubahan fraksi bakar satu siklus operasi (30 MW, 20,48 hari)	2,87
Reaktivitas lebih teras	9,65
Nilai total batang kendali	-13,84
Margin reaktivitas padam	-4,19
Reaktivitas batang kendali terbesar	2,87
Margin reaktivitas padam saat OSR	-1,32

Tabel 6. Hasil perhitungan kesetimbangan neutron teras oksida dan silisida.

Laju (neutron s^{-1})	G	Oksida	Silisida
Produksi	1	$2,84866 \times 10^{16}$	$2,84865 \times 10^{16}$
	2	$9,73042 \times 10^{15}$	$9,73038 \times 10^{15}$
	3	$7,67078 \times 10^{12}$	$7,67073 \times 10^{12}$
	4	0	0
Serapan	1	$-2,47542 \times 10^{14}$	$-2,51779 \times 10^{14}$
	2	$1,53380 \times 10^{14}$	$1,54962 \times 10^{14}$
	3	$3,00376 \times 10^{15}$	$3,01603 \times 10^{15}$
	4	$2,75635 \times 10^{16}$	$2,76507 \times 10^{15}$

Keterangan : panjang siklus teras 550MWD

Tabel 7. Penentuan harga w_n/γ untuk teras oksida dan silisida.

Bahan bakar	Kelompok energi	Laju pembelahan (neutron s^{-1})	Laju serapan (neutron s^{-1})	w_n/γ	w_n/γ total
Oksida	1	$2,8951 \times 10^{14}$	$-2,0179 \times 10^{14}$	-1,435	1,862
	2	$1,7867 \times 10^{14}$	$1,5927 \times 10^{14}$	1,122	
	3	$2,2557 \times 10^{15}$	$2,8586 \times 10^{15}$	0,789	
	4	$3,5243 \times 10^{16}$	$2,5435 \times 10^{16}$	1,386	
Silisida	1	$2,8888 \times 10^{14}$	$-2,0548 \times 10^{14}$	-1,406	1,880
	2	$1,7935 \times 10^{14}$	$1,6074 \times 10^{14}$	1,116	
	3	$2,2626 \times 10^{15}$	$2,8682 \times 10^{15}$	0,789	
	4	$3,5236 \times 10^{16}$	$2,5503 \times 10^{16}$	1,382	

Keterangan : perhitungan pada kondisi bahan bakar segar, dingin, BOC dan tanpa xenon

Akan tetapi, jika nilai fraksi bakar maksimum diakhir siklus ditetapkan sama, maka harga panjang siklus operasi teras setimbang silisida relatif lebih panjang dari panjang siklus teras setimbang oksida. Hal ini disebabkan nilai w_n/γ silisida lebih besar dari w_n/γ oksida, sehingga laju hilangnya nuklida U^{235} di teras bahan bakar oksida lebih besar dibanding silisida seperti yang disajikan pada Tabel 7. Perbandingan hasil hitungan karakteristik teras setimbang oksida dan silisida RSG-GAS dapat dilihat pada Tabel 8.

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa teras silisida dapat dioperasikan rata-rata 620 MWD

(perhitungan 614 MWD) dan lebih besar dari teras oksida rata-rata 520 MWD, Kecuali pada teras ke dua silisida dibakar 570,10 MWD. Hal ini dilakukan karena pada teras pertama silisida terlalu banyak dibakar yaitu 630,32 MWD sehingga pada teras selanjutnya dibakar lebih kecil energinya. Karakteristik reaktivitas teras silisida tidak ada yang melampaui batas keselamatan. Reaktivitas lebih merata teras oksida sekitar 6,6 % sedangkan pada teras silisida 7,8 %. Reaktivitas *shut-down* margin untuk semua teras mencukupi sehingga tidak terjadi pelanggaran batas keselamatan operasi pada teras setimbang semua parameter keselamatan terpenuhi.

Tabel 8. Parameter teras setimbang oksida dan silisida-2,96 hasil perhitungan.

Parameter Teras	Oksida 2,96 gU cm ⁻³	Silisida 2,96 gU cm ⁻³
Panjang siklus operasi (MWD/hari)	614,3/20,47	614,6/20,48
Fraksi bakar rerata BOC (%)	23,8	23,8
Fraksi bakar rerata EOC (%)	30,3	30,3
Fraksi bakar buang maksimum EB (%)	52,3	52,3
Fraksi bakar buang maksimum EK (%)	56,0	56,0
Faktor puncak daya radial maksimum	1,23	1,23
Parameter kinetik:		
Fraksi Neutron kasip, (β_{eff})	$7,201 \times 10^{-3}$	$7,186 \times 10^{-3}$
Umur Generasi Neutron ($\Lambda, \mu s$)	56,443	58,2830
Umur Neutron Serempak (l, s)	62,970	64,513
Konstanta Peluruhan Neutron Serempak (α, s^{-1})	114,367	111,394

Tabel 9. Hasil eksperimen karakteristik teras silisida dan oksida RSG-GAS

Teras RSG-GAS	ρ lebih (%)	ρ total (%)	ρ bk terbesar (%)	ρ padam (%)	ρ padam stuck rod (%)	Energi (MWD)	Bum (%)	Bur (%)
Oksida	6,67	-11,10	-1,73	-4,38	-2,65	529,30	50,47	28,78
	6,07	-9,38	-1,67	-3,31	-1,64	526,44	50,81	28,41
	6,92	-10,58	-1,61	-3,66	-2,05	534,24	50,05	29,75
	7,46	-10,55	-1,54	-3,09	-1,55	500,14	49,10	27,85
Silisida								
	8,134	-12,78	-1,87	-4,64	-2,77	636,32	53,67	29,65
	7,973	-13,25	-1,89	-5,28	-3,39	570,10	51,01	29,41
	8,136	-13,43	-1,85	-5,30	-3,45	618,82	52,24	30,15
	-7,432	-12,63	-1,85	-5,19	-3,24	620,35	52,03	30,63

Keterangan : ρ = reaktivitas, bk = batang kendali, Bum = *Burn up* maksimum, Bur = *Burn up* rerata.

KESIMPULAN

Teras setimbang silisida dengan kerapatan uranium sebesar $2,96 \text{ gU cm}^{-3}$ mampu membangkitkan energi sebesar 614,6 MWD atau naik sebesar 0,325 % dari teras setimbang oksida dengan fraksi bakar maksimum sebesar 56 %. Sehingga teras setimbang silisida lebih efektif dan efisien dari pada teras setimbang oksida. Karakteristik reaktivitas dan parameter teras setimbang silisida telah memenuhi kriteria batas keselamatan sehingga tujuan dari penelitian ini telah berhasil. Dengan demikian reaktor RSG-GAS dapat menggunakan teras setimbang silisida dengan panjang siklus selama 20,48 hari dengan kerapatan uranium sebesar $2,96 \text{ gU cm}^{-3}$.

DAFTAR PUSTAKA

- ARBIE, B., et al., *Conversion Study From Oxide To Silicide Fuel For The Indonesian 30 MW Multipurpose Reactor G.A. Siwabessy*, Proc. of the 18th International Meeting on RERTR, Paris 1995.
- LIEM, P.H., et al., *Fuel Management Strategy For The New Equilibrium Silicide Core Design Of RSG GAS (MPR-30)*, Journal of Nuclear Engineering and Design 180 1998.
- SEMBIRING, T.M., et al., *Neutronic Design Of Mixed Oxide-Silicide Cores For The Core Conversion Of RSG-GAS Reactor*, Journal of ATOM INDONESIA 27, (2) 2001.

- BATAN, *Safety Analysis Report of Multi Purpose Reactor 30 MW*, BATAN, Jakarta 1987.
- SUPARLINA, L. dan SEMBIRING, T.M., *Pembentukan Teras Setimbang Silisida 300 g RSG-GAS Melalui Teras Campuran Silisida 250 g dan 300 g*, Seminar Ke-6 Teknologi Dan Keselamatan PLTN Serta Fasilitas Nuklir, Bandung, 2002.
- ASKEW, J.R. et al., *A General Description Of The Code WIMS*, Journal Br. Nucl. Energy Soc. 5, 1966.
- TUKIRAN S, SURIAN PINEM, *Analisis Efek Suhu Terhadap Reaktivitas Teras RSG-GAS Berbahan Bakar Silisida*, Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir, Vol. 3, No. 3 Oktober 2001.

TANYA JAWAB

Azizul Khakim

- Berapa fraksi Vol porositas U_3O_8 dan U_3Si_2 dan bagaimana pengaruhnya terhadap reaktivitas teras?

Tukiran

- Fraksi Vol bahan bakar antara oksida dan silisida sama sehingga tidak ada pengaruh ke reaktivitas.