

## PERHITUNGAN KRITIKALITAS TERAS SILISIDA 5,2 g U/cc

Lily Suparlina

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir - BATAN

### ABSTRAK

**PERHITUNGAN KRITIKALITAS TERAS SILISIDA 5,2 g U/cc.** Perhitungan kritikalitas teras silisida RSG-GAS kerapatan 5,2 g U/cc telah dilakukan. Konfigurasi teras yang digunakan adalah teras optimum yang terdiri dari 24 elemen bakar standar dan 8 elemen kendali serta 8 buah posisi iradiasi. Tampang lintang makroskopik sel bahan bakar hasil perhitungan paket program WIMSD-B5 digunakan sebagai masukan perhitungan teras setimbang yang dilakukan dengan paket program Batan-EQUIL-2D. Data fraksi bakar bahan bakar dalam teras sebagai salah satu keluaran paket program Batan-EQUIL-2D digunakan dalam perhitungan kritikalitas teras silisida 5,2 g U/cc dengan paket program difusi teras 2 dimensi Batan-2DIFF. Perhitungan teras dilakukan untuk panjang siklus operasi 1200 MWD pada daya 20 MW. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa reaktivitas lebih teras awal siklus kondisi dingin bebas xenon adalah 10,35 %  $\Delta k/k$  sedangkan harga reaktivitas lebih teras akhir siklus kondisi panas, xenon setimbang 1,98 %  $\Delta k/k$ . Harga reaktivitas padam kondisi stuck rod -1,72 %  $\Delta k/k$  dan fraksi bakar buang maksimum 46,96. Faktor puncak daya radial 1,23 dan fluks neutron termal di posisi iradiasi  $3,63 \times 10^{14} \text{ n cm}^{-2}\text{det}^{-1}$ . Hasil perhitungan menunjukkan bahwa harga parameter neutronik diatas memenuhi kriteria keselamatan.

Kata kunci : reaktivitas, kritikalitas, silisida ,

### ABSTRACT

**CRITICALITY CALCULATION OF THE RSG-GAS SILICIDE 5.2 g U/cc CORE.** The 5.2 g U/cc silicide RSG-GAS core criticality calculation has been carried out. The optimum core configuration which consists of 24 standard fuel elements, 8 control fuel elements and 8 irradiation positions. The fuel cell macroscopic cross section calculated by WIMS-B5 is used in equilibrium core calculation using Batan-EQUIL-2D. The in core burn-up fraction data as the output of Batan-EQUIL-2D were used for core criticality calculation using 2 dimension diffusion code Batan-2DIFF. The core calculation were performed for 1200 MWD cycle length at 20 MW power level. The core calculation showed that the beginning of cycle for cold and clean condition is 10.35 %  $\Delta k/k$  while the end of cycle reactivity for hit xenon equilibrium is 1.98 %  $\Delta k/k$ . The stuck rod shutdown reactivity is 1.72 %  $\Delta k/k$  and discharged burn-up fraction is 46.96. The radial power peaking factor and thermal neutron flux at irradiation position are 1.23 and  $3,63 \times 10^{14} \text{ n cm}^{-2}\text{det}^{-1}$  respectively. The analysis result shows that the above neutronic parameters met the safety criteria.

Keywords : reactivity, criticality, silicide

### PENDAHULUAN

Reaktor RSG-GAS adalah reaktor penelitian yang sejak bulan September 2002 menggunakan bahan bakar silisida ( $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ ) dengan densitas uranium sebesar 2,96 g U/cc dengan panjang siklus operasi sekitar 600 MWD. Perubahan penggunaan bahan bakar silisida dengan kerapatan yang lebih tinggi di dalam teras akan mengakibatkan terjadinya perubahan parameter neutronik teras seperti penambahan reaktivitas lebih awal siklus dan penurunan marjin reaktivitas padam. Beberapa penelitian mengenai kemungkinan penggunaan bahan bakar silisida dengan muatan yang lebih tinggi di teras RSG-GAS telah dilakukan. Bahan bakar uranium silisida dipilih karena dapat dipabrikasi sampai dengan

kerapatan uranium sebesar 5,2 g/cc<sup>[1]</sup>.

Peningkatan kerapatan bahan bakar silisida 3, 55 g U/cc dengan konfigurasi teras yang sama dapat menaikkan panjang siklus sebesar 7 (tujuh) hari daya penuh (210 MWD)<sup>[2]</sup>. Jika bahan bakar silisida dengan kerapatan 4,8 g U/cc digunakan di teras RSG-GAS, maka perlu dilakukan perubahan pada konfigurasi teras. Jika tidak, maka beberapa parameter operasi akan tidak memenuhi syarat keselamatan operasi.

Pada penelitian lanjutan, telah terbentuk konfigurasi teras setimbang silisida kerapatan 4,8 g U/cc yang optimum. Teras setimbang tersebut terdiri dari 24 elemen bakar standar dan 8 elemen kendali dan 8 buah posisi iradiasi<sup>[3]</sup>, 12 buah elemen berilium yang ada pada konfigurasi teras RSG-GAS saat ini, dikeluarkan sehingga grid yang tadinya berisi elemen berilium menjadi berisi air. Penelitian tersebut menyimpulkan bahwa meskipun jumlah bahan bakar relatif sedikit, akan tetapi waktu siklus operasinya menjadi 1000 MWD, lebih besar 67 % dibanding teras silisida saat ini (600 MWD), memiliki fluks neutron termal sebesar  $2,45 \times 10^{14}$  neutron/cm<sup>2</sup>.det yang lebih besar 20 % dari teras saat ini walau daya nominalnya 30 % lebih rendah.

Berdasarkan hasil penelitian di atas, maka dilakukan pula penelitian penggunaan teras optimum tersebut untuk bahan bakar silisida dengan muatan yang lebih tinggi, yaitu 5,2 g U/cc. Kajian dilakukan dengan melakukan perhitungan kritikalitas teras silisida 5,2 g U/cc untuk mengetahui besaran parameter neutronik seperti reaktivitas awal siklus dan margin padam reaktor, neraca reaktivitas serta pemilihan panjang siklus operasi yang paling optimum.

Perhitungan kritikalitas dilakukan dengan menggunakan paket program difusi 2 dimensi Batan-2DIFF, dengan menggunakan library yang berisi harga tampang lintang sel bahan bakar hasil perhitungan WIMSD-B5. Sedangkan perhitungan distribusi fraksi bakar dalam teras dilakukan dengan paket program Batan-EQUIL-2D<sup>[5]</sup>.

## **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 keselamatan yang digunakan adalah:

- Marjin reaktivitas padam minimum (*stuck rod condition*) adalah 0,5 %  $\Delta k/k$ .

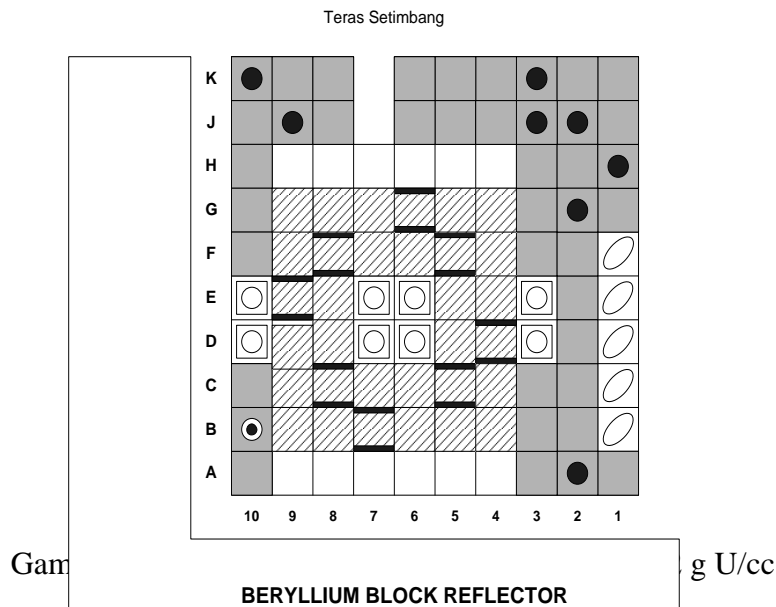
- Faktor puncak daya (FPD) radial maksimum adalah 1,4.

### Perhitungan Sel

Sebelum dilakukan perhitungan teras, maka terlebih dahulu disiapkan konstanta kelompok difusi dengan paket program WIMSD-B5<sup>[4]</sup>. Paket program ini menyiapkan konstanta kelompok difusi neutron dalam 4 kelompok tenaga neutron dengan menggunakan library ENDF-6. Syarat batas yang digunakan adalah 10 MeV; 0,821 MeV; 5,52 keV dan 0,625 eV. Disamping sebagai fungsi tenaga neutron, konstanta kelompok difusi yang dibangkitkan dinyatakan dalam fungsi jenis bahan bakar, berat uranium, fungsi kondisi reaktor (panas, dingin, xenon setimbang, tanpa xenon dan tanpa samarium) dan massa <sup>235</sup>U (5,2 g/cc). Hal ini dibuat agar dapat dilakukan perhitungan kesetimbangan reaktivitas teras RSG-GAS.

### Perhitungan Kritikalitas dan Reaktivitas Teras

Dalam perhitungan teras, teras setimbang RSG-GAS dimodelkan dalam geometri 2 dimensi X-Y, 4 kelompok energi neutron dengan program difusi neutron 2 dimensi Batan-EQUIL-2D<sup>[4]</sup> yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gam

Salah satu masul

g U/cc

QUIL-2D ialah pola

pergeseran bahan bakar dimana 24 buah elemen bakar dan elemen kendali dikelompokkan ke dalam 4 kelas fraksi bakar. Akibatnya pada awal siklus ada 6 buah elemen bakar dan 2 elemen kendali dimuatkan sesuai dengan jumlah elemen bakar bekas dengan fraksi bakar maksimum yang dikeluarkan dari teras. Pola pergeseran bahan bakar dalam teras ditunjukkan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Strategi Pergeseran Bahan Bakar pada Teras Setimbang silisida 5,2 g U/cc.

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	-	-

Dalam penelitian ini, perhitungan teras dilakukan dengan variasi panjang siklus operasi 900, 1000, 1100, 1200, 1300, 1400 dan 1500 MWD dengan menggunakan nilai buckling  $1,8984E-03$ . 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
- Harga reaktivitas awal siklus kondisi dingin dengan xenon
- Harga reaktivitas awal siklus kondisi panas xenon setimbang
- Harga reaktivitas awal siklus panas xenon setimbang
- Margin padam pada awal siklus saat BOC
- Fraksi bakar buang maksimum
- PPF radial maksimum
- Harga fluks neutron pada posisi Iradiasi

## HASIL DAN PEMBAHASAN

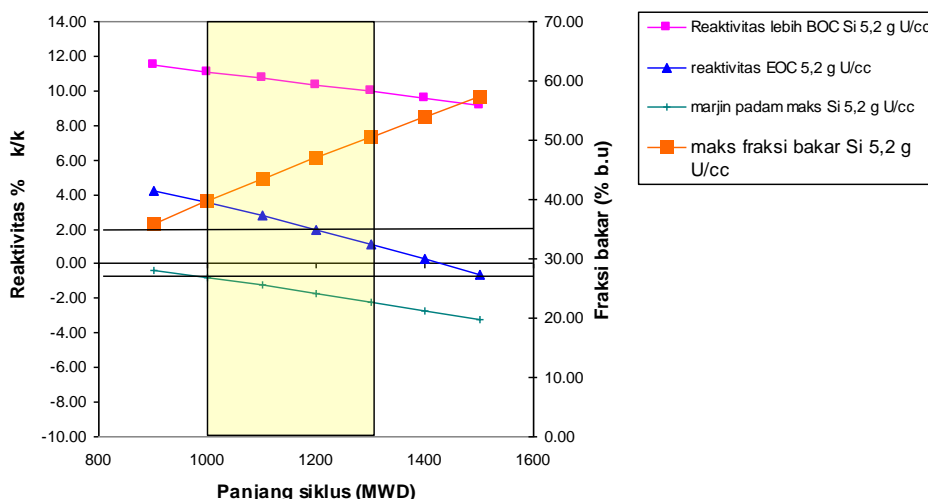
Pencarian teras setimbang dengan program Batan-EQUIL-2D dimulai dengan semua bahan bakar standar dan bahan bakar kendali dalam kondisi segar. Dari hasil perhitungan tersebut didapat harga distribusi fraksi bakar dalam teras setimbang,.

Data distribusi fraksi bakar tersebut, digunakan dalam perhitungan teras dengan paket program Batan-2DIFF untuk mendapatkan harga parameter neutronik seperti reaktivitas lebih, marjin padam, fluks dan Faktor Puncak Daya (FPD) radial serta paramter neutronik

lainnya seperti pembangkitan xenon, perubahan reaktivitas dari kondisi dingin ke panas. Data reaktivitas teras hasil perhitungan kritikalitas ditunjukkan pada Tabel 2 dan karakteristiknya ditunjukkan pada Gambar 2.

Tabel 2. Reaktivitas Teras Silisida 5,2 g U/cc RSG-GAS Hasil Perhitungan Batan-2DIFF

Panjang siklus (MWD)	Reaktivitas lebih awal siklus (% $\Delta k/k$ )	Reaktivitas lebih akhir siklus (% $\Delta k/k$ )	Marjin padam (% $\Delta k/k$ )	Fraksi bakar buang maksimum (% $\Delta k/k$ )
900	11,46	4,25	-0,36	35,94
1000	11,10	3,53	-0,80	39,66
1100	10,73	2,77	-1,25	43,35
<b>1200</b>	<b>10,35</b>	<b>1,98</b>	<b>-1,72</b>	<b>46,96</b>
1300	9,96	1,15	-2,20	50,50
1400	9,55	0,27	-2,70	54,00
1500	9,12	-0,65	-3,23	57,40

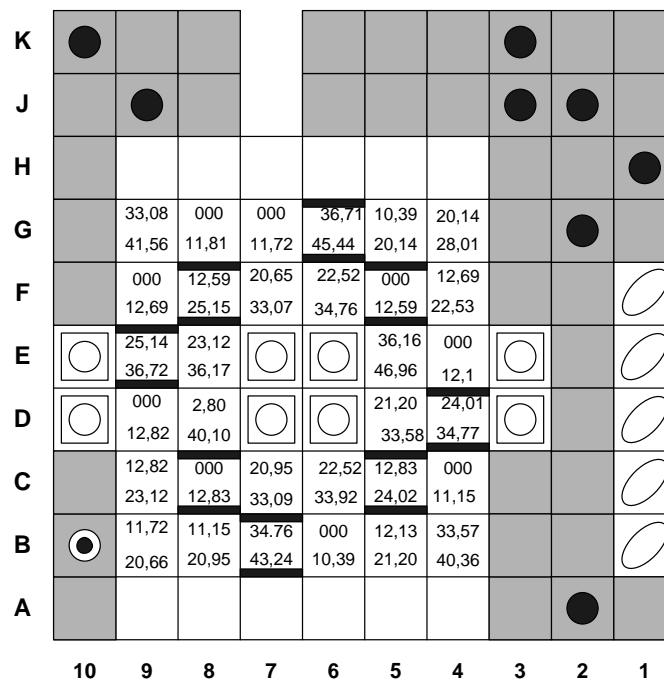


Gambar 2. Karakteristik Reaktivitas Teras Silisida 5,2 g U/cc RSG-GAS

Dari ke 7 buah panjang siklus yang digunakan, maka terlihat bahwa daerah panjang siklus operasi yang memungkinkan untuk teras silisida 5,2 g U/cc ialah antara 1000 – 1300 MWD. Dimana harga reaktivitas lebih teras awal siklus dingin bebas xenon antara 11,10–9,6 %  $\Delta k/k$ , sehingga teras tersebut mempunyai persediaan reaktivitas yang cukup untuk satu siklus operasi. Reaktivitas lebih akhir siklus kondisi panas xenon setimbang antara 3,53–1,15 %  $\Delta k/k$ , yang berarti pada akhir siklus ada cadangan reaktivitas eksperimen sekitar 1 %. Reaktivitas padam kondisi stuck rod antara -0,8–2,20 %  $\Delta k/k$ , yang berarti reaktor masih dapat dipadamkan meski satu batang kendali gagal masuk.

Dari data reaktivitas diatas, dapat dipilih salah satu panjang siklus yang paling baik untuk dihitung neraca reaktivitasnya. Pemilihan tersebut berdasarkan pertimbangan seperti tersedia reaktivitas lebih awal siklus yang cukup agar reaktor dapat beroperasi untuk satu siklus. Besarnya reaktivitas akhir siklus yang cukup, mengingat ada kemungkinan reaktor digunakan untuk ke[erluasn eksperimen di fasilitas iradiasi. Besarnya reaktivitas padam kondisi stuck rod, dimana reaktor dapat dipadamkan bila diperlukan meski satu batang kendali gagal masuk.

Panjang siklus yang dipilih adalah 1200 MWD dengan daya operasi 20 MW termal dan distribusi fraksi bakar dalam teras ditunjukkan dalam Gambar 3. Reaktivitas yang tersedia adalah 10,35 %  $\Delta k/k$  dan 1,98 %  $\Delta k/k$  masing-masing untuk awal dan akhir siklus, serta reaktivitas padam kondisi yang cukup yaitu -1,72 %  $\Delta k/k$ . Pada Gambar 3 fraksi bakar bahan bakar dibagi ke dalam 4 kelas. Dalam setiap kisi bahan bakar ada dua harga fraksi bakar. Baris atas menunjukkan fraksi bakar awal siklus dan baris bawah menunjukkan fraksi bakar akhir siklus. Setiap awal siklus, posisi bahan bakar bergeser sesuai pola pergeseran bahan bakar 4/2 yang ditunjukkan pada Tabel 2, dimana pada akhir siklus 4 buah bahan bakar 2 buah bahan bakar pada elemen kendali dengan fraksi bakar terbesar dikeluarkan dan bahan bakar segar ditambahkan ke dalam teras.



Gambar 3. Data distribusi fraksi bakar bahan bakar silisida 5,2 g U/cc

Data kritikalitas teras silisida 5,2 g U/cc dapat diketahui dari hasil perhitungan teras dan ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Reaktivitas teras silisida 5,2 g U/cc RSG-GAS

PARAMETER	Silisida 5,2 g U/cc
Daya operasi nominal (MW)	20
Panjang siklus operasi reaktor (MWD/hari)	1200/54
Fraksi bakar rerata BOC (%)	15,38
Fraksi bakar rerata EOC (%)	26,27
Fraksi bakar buang maksimum (%)	46,96
Faktor Puncak daya radial maksimum	1,23
<b>Neraca reaktivitas (% <math>\Delta k/k</math>)</b>	
Reaktivitas teras lebih BOC dingin bebas xenon	10,35
Reaktivitas lebih teras EOC panas xenon setimbang	1,98
Margin reaktivitas padam	-1,72
Kondisi dingin ke panas	0,65
Xenon setimbang	4,59
Perubahan fraksi bakar satu siklus	10,89
Eksperimen, partial xenon override, dll	1,5
Nilai batang kendali total	16,94
<b>Fluks neutron (<math>\times 10^{14}</math> n <math>\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}</math>) CIP/IP 8 posisi</b>	
Fluks neutron termal rerata maksimum	3,63

Dari Tabel 3 terlihat dengan daya reaktor 20 MW dan dioperasikan selama 54 hari (1200 MWD), reaktivitas lebih teras awal siklus yang dihasilkan sebesar 10,35 %  $\Delta k/k$  dan reaktivitas lebih akhir siklus 1,98 %  $\Delta k/k$ . Faktor puncak daya rerata 1,23.

Dengan panjang siklus operasi yang lebih panjang, maka harga reaktivitas lebih akhir siklus teras silisida 5,2 g U/cc lebih rendah dalam hal ini untuk panjang siklus operasi 1000 MWD, adalah 1,98. Namun masih tersedia reaktivitas yang dapat digunakan di akhir siklus sebesar 1,5 %  $\Delta k/k$ . Fluks neutron di posisi iradiasi yang diberikan juga lebih besar, karena adanya pengaruh dari bahan bakar disekitarnya.

## KESIMPULAN

Teras silisida dengan densitas 5,2 g U/cc dapat menggunakan konfigurasi teras dengan komposisi 24 bahan bakar standar, 8 bahan bakar pada elemen kendali dan 8 posisi iradiasi dengan pola pergantian bahan bakar 4/2 dengan 4 kelas fraksi bakar.

- Dengan waktu siklus operasi 1200 MWD, menghasilkan reaktivitas lebih awal siklus sebesar 10,35 %  $\Delta k/k$  dan reaktivitas lebih akhir siklus 1,98 %  $\Delta k/k$ . Memiliki fluks

neutron termal sebesar  $3,63 \times 10^{14}$  neutron/cm<sup>2</sup>.det dan faktor puncak daya rerata maksimum sama yaitu 1,23

- Dengan demikian, ditinjau dari segi neutronik, seluruh parameter neutronik teras silisida 5,2 g U/cc berada dalam batas keselamatan.

#### **DAFTAR PUSTAKA**

1. Languille, J.P. Durand dan A. Gay, "New High Density MTR Fuel The CEA-CERCA-COGEMA Development Program", Transaction of The 2<sup>nd</sup> Topical Meeting on RRFM Bruges, Belgia 1998
2. Liem P.H, *dkk.*, "Fuel Management Strategy For The New Equilibrium Silicide Core Design Of RSG GAS (MPR-30)", Journal of Nuclear Engineering and Design **180** (1998).
3. Lily Suparlina, "Penentuan Konfigurasi Teras RSG-GAS dengan Jumlah Elemen Bakar Silisida 4,8 g U/cc Optimum", Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir Tri Dasa Mega Volume 7, Nomor 2, Juni 2005
4. Askew, J.R. *et al.*, A General Description Of The Code WIMS, Journal Br. Nucl. Energy Soc. **5** (1966).
5. 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)