

MANAJEMEN KONVERSI TERAS RSG-GAS BERBAHAN BAKAR SILISIDA TINGKAT MUAT TINGGI

Lily Suparlina
Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir
Gedung 80 , kawasan Puspiptek, Serpong
lilyrsg@batan.go.id

Diterima editor 26 Agustus 2013
Disetujui untuk publikasi 23 September 2013

ABSTRAK

MANAJEMEN KONVERSI TERAS RSG-GAS BERBAHAN BAKAR SILISIDA TINGKAT MUAT TINGGI. Penggunaan bahan bakar tingkat muat tinggi dapat memperpanjang siklus operasi reaktor sampai 40 hari. Telah dilakukan perancangan konversi teras dari silisida tingkat muat rendah menuju tingkat muat tinggi. Manajemen konversi teras dari teras silisida tingkat muat 2,96 gU/cm³ menuju teras silisida 4,8 gU/cm³ dilakukan secara bertahap dengan melakukan perhitungan manajemen bahan bakar dalam teras yang menggunakan paket program perhitungan 2 dimensi Batan-FUEL. Penggantian bahan bakar di teras menggunakan pola pergeseran bahan bakar 5/1 yaitu setiap awal siklus terjadi penggantian 5 buah elemen bahan bakar standar dan 1 buah elemen bahan bakar kendali. Dengan mempertahankan konfigurasi teras yang sudah ada, konversi teras dapat dilakukan melalui simulasi teras campuran 2,96 gU/cm³ - 4,8 gU/cm³ dengan memperhatikan batasan keselamatan reaktor yang dipersyaratkan. Oleh karena itu tujuan dari penelitian ini adalah untuk merancang teras campuran yang akan menghasilkan parameter neutronik yang aman pada teras penuh pertama silisida tingkat muat tinggi. Dalam perancangan ini digunakan batang kendali pengaman untuk menambah margin padam yang berkurang akibat pemuatan bahan bakar tingkat muat tinggi. Hasil analisis menunjukkan bahwa konversi teras silisida tingkat muat 2,96 g U/cm³ menuju 4,8 g U/cm³ dapat dilakukan melalui teras campuran tidak langsung dalam 2 tahap yaitu konversi teras silisida 2,96 gU/cm³ - 3,55 gU/cm³ dan konversi teras silisida 3,55 gU/cm³ - 4,8 gU/cm³ dengan performa yang baik. Keuntungan utama dari penggunaan bahan bakar silisida tingkat muat tinggi 4,8 gU/cm³ dibanding teras silisida tingkat muat rendah 2,96 gU/cm³ pada teras RSG-GAS ialah bahwa panjang siklus operasi dapat lebih panjang 18 hari sehingga dapat menghemat penggunaan bahan bakar.

Kata kunci : silisida, BKP, teras campuran, pola 5/1, Batan-FUEL

ABSTRACT

MANAGEMENT OF RSG-GAS HIGH DENSITY SILICIDE FUELED CORE. The usage of high density fuel can extend the reactor operation up to 40 days. Designing of low to high density silicide fueled core conversion has been carried out. The management of core conversion was done gradually using 2 dimensional diffusion code Batan-FUEL. Replacement of unused fuel elements in core using fuel elements reshuffle pattern 5/1, which at the beginning of cycle there are 5 fuel elements and 1 control element replaced. By maintaining the existing core configuration, the core conversion can be performed through mix core of 2,96 gU/cm³ - 4,8 gU/cm³ silicide fueled with respect to reactor safety limits requirements. Therefore, the objective of this work is to design the mixed cores on the neutronic performance to achieve safely at first full-silicide core for the reactor with the high uranium meat density. In the design, safety rods were used to increase the decreasing minimum shutdown margin due to high density fuel loading. The analyses results show that silicide core conversion of 2,96 gU/cm³ to 4,8 gU/cm³ density can be performed by means of indirect mix core in two steps i.e. silicide of 2,96 g U/cm³ - 3,55 gU/cm³ core conversion and silicide of 3,55 gU/cm³ - 4,8 gU/cm³ conversion with good performance. The main advantage of using high density silicide fuels of 4.8 gU/cm³ than low density silicide fuels of 2.96 gU/cm³ on the RSG-GAS core is that, the operating cycle length of 18 days could be longer in order to save fuel usage.

Keywords : silicide, safety rod, mix core, 5.1 pattern, Batan-FUEL

PENDAHULUAN

Reaktor Serba Guna G.A Siwabessy (RSG-GAS) yang saat ini beroperasi telah mengalami perubahan penggunaan bahan bakar tipe pelat atau *MTR (Material Testing Reactor)* dari U_3O_8 -Al menjadi U_3Si_2 -Al dengan tingkat muat sama yaitu $2,96 \text{ gU/cm}^3$. Konversi teras RSG-GAS dari teras berbahan bakar oksida menuju teras berbahan bakar silisida dilakukan melalui teras campuran oksida-silisida dimulai dari teras 36. Pada teras 45 seluruh teras sudah berisi bahan bakar silisida $2,96 \text{ gU/cm}^3$ pada tahun 2002 dan tidak terjadi perubahan parameter neutronik yang signifikan pada teras silisida $2,96 \text{ gU/cm}^3$ dibandingkan dengan teras oksida $2,96 \text{ gU/cm}^3$ [1-5].

Untuk meningkatkan panjang siklus operasi reaktor, maka telah dilakukan penelitian tentang penggunaan bahan bakar silisida dengan tingkat muat $3,55 \text{ gU/cm}^3$. Silisida dengan tingkat muat $3,55 \text{ gU/cm}^3$ dipilih karena tidak perlu mengubah konfigurasi dan parameter teras lainnya. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa penggunaan bahan bakar silisida dengan tingkat muat $3,55 \text{ gU/cm}^3$ dapat menambah panjang siklus operasi reaktor sebesar 7 (tujuh) hari dengan daya penuh (210 MWD)[6].

Untuk lebih meningkatkan panjang siklus operasi, maka dilakukan penelitian penggunaan bahan bakar dengan tingkat muat $4,8 \text{ gU/cm}^3$ pada teras RSG-GAS. Pada saat ini beberapa reaktor riset yang menggunakan bahan bakar silisida tingkat muat tinggi, beberapa diantaranya ialah JMTR dan JRR-3 di Jepang serta Opal di Australia dan yang sedang dalam taraf pembangunan diantaranya reaktor Pallas di Belanda, JHR di Perancis dan JRTR di Jordan. Beberapa penelitian tentang penggunaan bahan bakar silisida tingkat muat $4,8 \text{ gU/cm}^3$ telah dilakukan sebelumnya, namun belum diperhitungkan cara mencapai teras setimbang[7-13]. Dalam penelitian ini dilakukan cara yang paling efisien untuk mencapai teras setimbang silisida $4,8 \text{ gU/cm}^3$ tanpa mengubah konfigurasi teras dan parameter teras serta memenuhi batasan operasi reaktor saat ini. Konfigurasi teras RSG-GAS saat ini digunakan dalam konversi teras silisida $2,96 \text{ gU/cm}^3$ ke silisida $4,8 \text{ gU/cm}^3$ tanpa mengubah konfigurasi serta parameter teras. Peningkatan tingkat muat bahan bakar maka akan terjadi kenaikan reaktivitas yang tinggi dan untuk itu ditambah batang kendali pengaman untuk mengkompensasi margin reaktivitas padam agar syarat keselamatan operasi reaktor terpenuhi.

Tujuan dari program konversi teras adalah untuk mendapatkan teras setimbang yang optimal yaitu teras setimbang yang terbaik dari segi operasi reaktor dengan siklus operasi yang lebih panjang sehingga dapat menghemat bahan bakar serta strategi untuk mencapai teras setimbang. Program konversi dari teras silisida tingkat muat $2,96 \text{ gU/cm}^3$ menuju teras setimbang silisida tingkat muat $4,8 \text{ gU/cm}^3$ dilakukan melalui teras campuran silisida $2,96 \text{ gU/cm}^3$ dan $3,55 \text{ gU/cm}^3$ serta $4,8 \text{ gU/cm}^3$. Berdasarkan hal itu maka sebelum melaksanakan konversi teras, perlu dilakukan perhitungan manajemen konversi teras RSG-GAS.

Perhitungan konversi teras campuran dilakukan dalam 2 (dua) tahap, pertama perhitungan sel untuk menggenerasi tampang lintang material teras dengan menggunakan program WIMSD/B5[14] dan kedua adalah perhitungan teras dengan metode difusi neutron 2 dimensi Batan-EQUIL-2D yang merupakan bagian dari Batan-FUEL[15]. Kajian yang dilakukan dalam perhitungan teras ini hanya ditinjau dari aspek neutroniknya saja. Program konversi teras RSG-GAS diharapkan dapat menghasilkan desain teras silisida setimbang yang optimal.

Program Batan-FUEL

Batan-FUEL adalah paket program perhitungan manajemen bahan bakar di teras reaktor yang sudah dikembangkan dan diverifikasi Program Batan-FUEL merupakan paket perhitungan parameter neutronik yang menggunakan metode difusi neutron banyak kelompok energi dengan model geometri dua dan tiga dimensi. Saat ini Batan-FUEL digunakan dalam manajemen bahan bakar di teras reaktor RSG-GAS

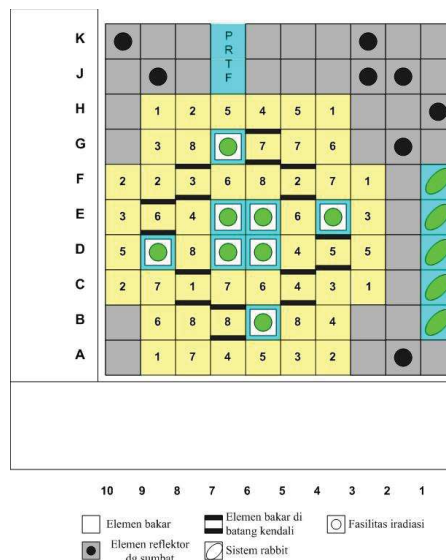
Paket program Batan-FUEL terdiri dari 3 bagian, yaitu :

1. Batan-EQUIL digunakan untuk pencarian teras setimbang dan fraksi bakar di awal dan akhir siklus.
2. Batan-2DIFF digunakan untuk perhitungan parameter neutronik 2 dimensi ke arah X-Y. Data parameter teras yang dihasilkan dalam perhitungan ini adalah reaktivitas lebih teras, margin padam, reaktivitas batang kendali, reaktivitas xenon, perubahan reaktivitas dalam satu siklus operasi (*burnup swing*), perubahan reaktivitas dari panas ke dingin (*hot to cold*), faktor puncak daya radial dan fluks neutron radial.
3. Batan-3DIFF digunakan untuk perhitungan parameter neutronik 3 dimensi dalam arah X-Y-Z seperti reaktivitas sebagai fungsi pemasukan batang kendali, fluks neutron aksial dan faktor puncak daya aksial.

Manajemen Bahan Bakar Dalam Teras

Manajemen bahan bakar dalam teras atau *in-core fuel management*, ialah penentuan pola penyusunan bahan bakar, penentuan fraksi bakar (*fuel burn-up*) dan seleksi jadwal pergantian bahan bakar, dalam rangka untuk memenuhi persyaratan dari aspek nuklir maupun ekonomi. Manajemen bahan bakar di dalam teras meliputi kegiatan pembentukan konfigurasi teras, penentuan fraksi bakar, panjang siklus operasi, pola pemasukan bahan bakar dan pelaksanaannya yang aman.

Untuk mendukung keselamatan dengan menyediakan reaktivitas negatif dari batang kendali, maka reaktor RSG-GAS didesain harus tetap dalam keadaan subkritis, meskipun satu buah batang kendali yang memiliki reaktivitas terbesar tidak dapat dimasukkan secara penuh ke dalam teras. Kondisi ini disebut sebagai kondisi satu batang kendali gagal masuk atau *one stuck rod*. Pengendalian reaktivitas di reaktor RSG-GAS dilakukan oleh 8 batang kendali yang didesain sebagai batang kendali pemadam disamping berfungsi untuk mengkompensasi reaktivitas lebih teras selama satu siklus operasi dan mengatur tingkat daya. Konfigurasi teras setimbang reaktor RSG-GAS disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Teras setimbang silisida teras RSG-GAS

Pola Pemuatan Bahan Bakar Teras Setimbang

Tujuan dan persyaratan pemasukan bahan bakar secara periodik ke teras adalah:

- Menambah jumlah reaktivitas lebih teras (dalam batas yang aman) agar dapat dioperasikan pada daya penuh selama panjang siklus operasi yang tertentu
- Mendapatkan distribusi pembangkitan panas yang merata di teras
- Menjamin bahwa fluks panas di sistem proteksi reaktor tidak melewati nilai batas
- Menjamin bahwa tingkat fluks neutron pada posisi iradiasi tetap dijaga pada tingkat yang diinginkan.

Dengan pola 5/1 terdapat 5 buah elemen bakar standar (EBS) dan sebuah elemen bakar kendali (EBK) segar yang dimasukkan ke dalam teras di awal siklus sebagai ganti dari 5 buah elemen bakar standar dan sebuah elemen kendali yang sudah mencapai fraksi bakar buang maksimumnya. Keakuratan pola pergeseran ini telah dibuktikan dalam pelaksanaan rutin manajemen bahan bakar teras RSG-GAS sejak tahun 1999. Pola pergeseran bahan bakar di teras RSG-GAS ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Manajemen bahan bakar di teras RSG-GAS dengan pola 5/1[19]

| Kelas fraksi bakar | Posisi di teras | | | | | | | |
|--------------------|-----------------|------|------|-----|------|-----|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| | ⇒ | ⇒ | ⇒ | ⇒ | ⇒ | ⇒ | ⇒ | ⇒ |
| Posisi di teras | H-9 | F-10 | G-9 | E-8 | D-3 | C-6 | G-5 | G-8 |
| | H-4 | F-9 | A-5 | H-6 | D-10 | G-4 | C-7 | B-8 |
| | F-3 | C-10 | E-3 | A-7 | H-7 | F-7 | F-4 | F-6 |
| | C-3 | H-8 | C-4 | D-5 | H-5 | E-5 | A-8 | B-5 |
| | A-9 | A-4 | E-10 | B-4 | A-6 | B-9 | C-9 | D-8 |
| | C-8 | F-5 | F-8 | C-5 | D-4 | E-9 | G-6 | B-7 |

Bahan Bakar Silisida

Penelitian dan pengembangan bahan bakar berpengayaan rendah telah banyak mengalami kemajuan dalam program *Reduced Enrichment Research and Test Reactor (RERTR)*. Pada saat ini bahan bakar yang bertingkat muat paling tinggi yang telah dikualifikasi untuk reaktor riset adalah bahan bakar pengayaan rendah silisida (U_3Si_2Al) dengan tingkat muat uranium dalam meat sebesar $4,8 \text{ g U/cm}^3$.

Satu perangkat bahan bakar standar terdiri dari 21 pelat elemen bahan bakar dengan dan satu perangkat bahan kendali terdiri dari 15 pelat elemen bakar dengan 2 sisi terluar berisi bahan penyerap $AgInCd$ yang berbentuk garpu.

Data teknis, gambar irisan penampang lintang bahan bakar standar dan bahan bakar pada elemen kendali ditunjukkan pada Tabel 2,

Tabel 2. Data teknis bahan bakar silisida pada teras reaktor RSG-GAS[1]

| Parameter Elemen Bakar | Data Teknis |
|---------------------------------------|-------------------|
| 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 bahan bakar | AlMg ₂ |
| Ketebalan kelongsong bahan bakar (mm) | 0,38 |
| Dimensi <i>fuel meat</i> (mm) | 0,54 x 62,75x600 |
| Material <i>fuel meat</i> | U_3Si_2Al |

| | |
|---|----------|
| Pengkayaan U-235 (w/o) | 19,75 |
| Tingkat muat 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 |

Batang Kendali Pengaman

Batang kendali pengaman (BKP) adalah batang kendali yang dipasang di luar teras aktif, yang fungsinya untuk meningkatkan kemampuan batang kendali yang sudah ada. Penambahan batang kendali pengaman diisyaratkan tidak merubah karakteristik operasi teras reaktor baik dari sisi neutronik maupun termohidrolik. Untuk memenuhi syarat tersebut pemilihan penambahan BKP berdasarkan fungsi dan batasan sebagai berikut:

- BKP hanya berfungsi sebagai batang kendali pengaman yang terintegrasi dengan sistem pancung reaktor.
- Posisi BKP diusahakan berada di luar daerah bahan bakar yaitu di daerah reflektor dan simetris, sehingga tidak merubah karakteristik operasi reaktor
- Penambahan BKP dapat menghasilkan margin reaktivitas padam teras minimum sebesar -0,5 % $\Delta k/k$.

Geometri dari batang kendali pengaman sama dengan geometri elemen kendali, hanya bagian bahan bakarnya diganti dengan dummy aluminium. Untuk perhitungan reaktivitas, posisi BKP semua diatas (*all up*) dan untuk perhitungan margin padam, posisi BKP di bawah (*down*).

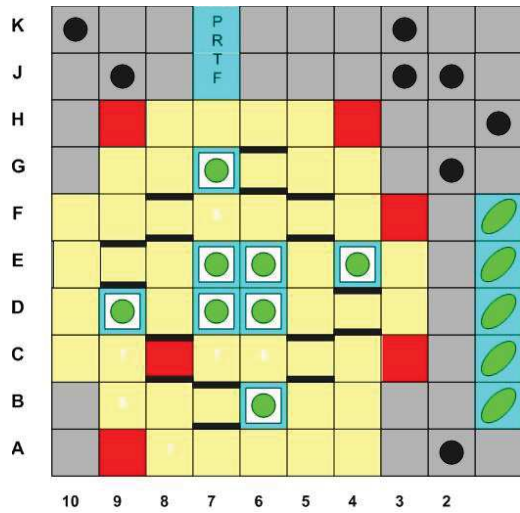
METODOLOGI

Generasi Tampang Lintang

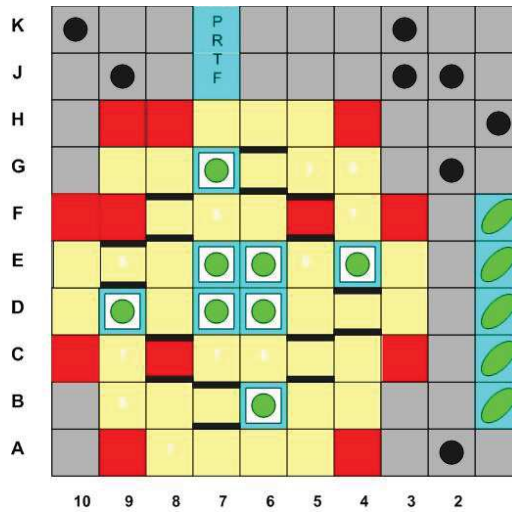
Generasi tampang lintang makroskopik bahan bakar fisil dan material teras lainnya dilakukan dalam perhitungan sel dengan paket program WIMSD/B5. Data masukan berupa kerapatan atom dan temperatur bahan bakar serta pembagian fraksi bakar ke dalam 17 langkah digunakan dalam perhitungan sel dalam WIMSD/B5 dan akan dihasilkan data keluaran berupa data tampang lintang makroskopik bahan bakar untuk kondisi dingin tanpa xenon dan samarium, dingin tanpa samarium, panas xenon dan samarium setimbang panas tanpa samarium.

Pemodelan Teras Campuran

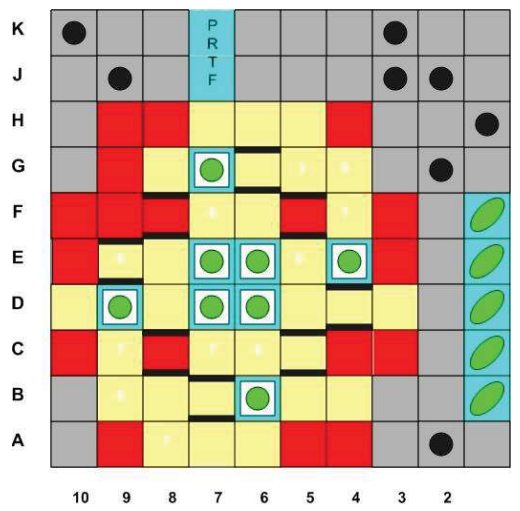
Pemodelan teras campuran silisida 2,96 gU/cm³ – 4,8 gU/cm³, 2,96 gU/cm³ - 3,55 gU/cm³, 3,55 gU/cm³ – 4,8 gU/cm³ dibuat berdasarkan pola pergeseran bahan bakar 5/1 seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3 dan disajikan pada Gambar 2 – 9. Langkah dan strategi pemuatan bahan bakar ke dalam teras campuran tersebut diatur sedemikian rupa sehingga parameter teras seperti reaktivitas lebih, margin padam minimum dan fraksi bakar buang maksimum di akhir siklus memenuhi batasan keselamatan.



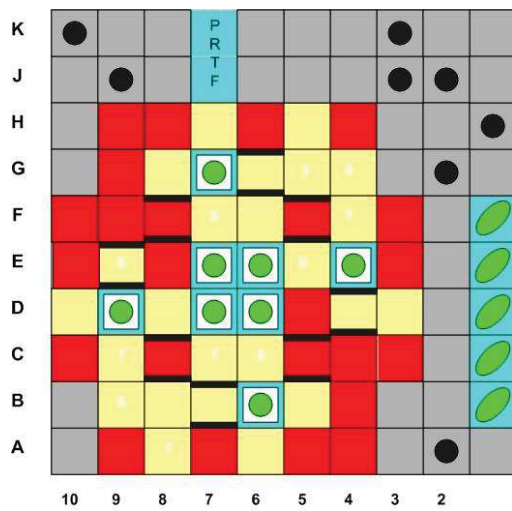
Gambar 2. Teras campuran 1



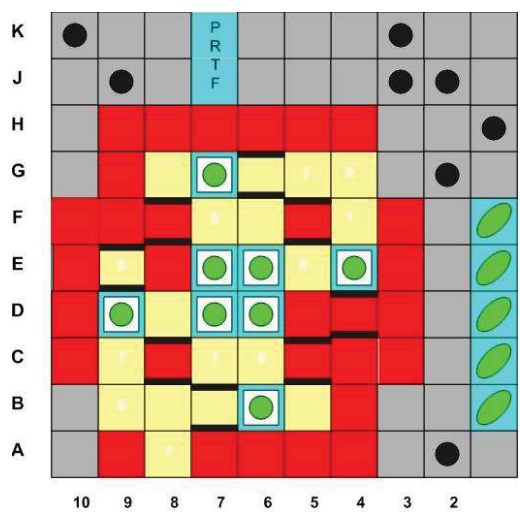
Gambar 3. Teras campuran 2



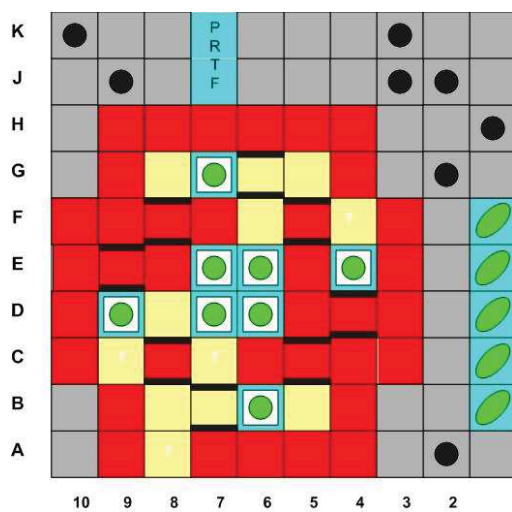
Gambar 4. Teras campuran 3



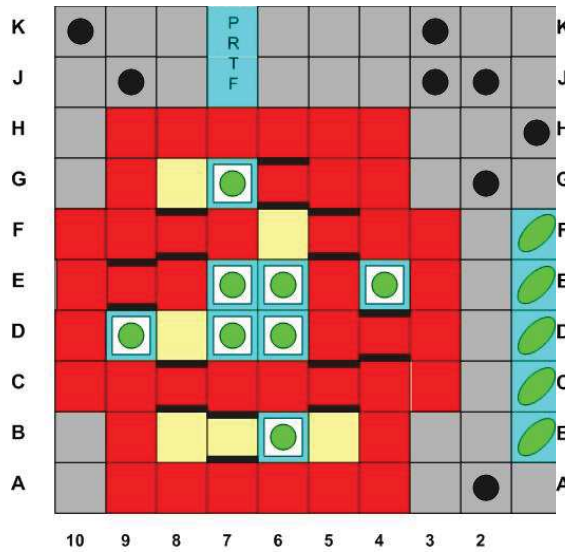
Gambar 5. Teras campuran 4



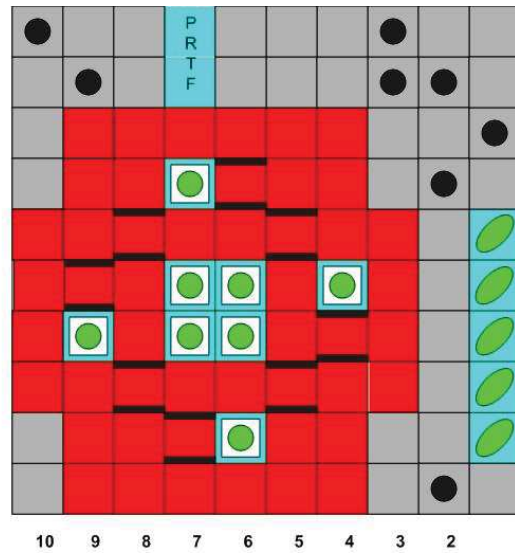
Gambar 6. Teras campuran 5



Gambar 7. Teras campuran 6



Gambar 8. Teras campuran 7



Gambar 9. Teras campuran 8

Keterangan:

 Si 2,96 gU/cm³

 Beryllium

 Fasilitas sistem rabbit

 Si 4,8 gU/cm³

 Beryllium dengan stopper

 Fasilitas iradiasi

 BKP

Batas Keselamatan Dalam Perhitungan Teras

Perhitungan teras campuran silisida langsung maupun tidak langsung perlu memperhatikan batasan keselamatan reaktor RSG-GAS. Batasan keselamatan yang digunakan dalam perhitungan ini ialah :

- Reaktivitas lebih teras awal siklus maksimum 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.
- Fraksi bakar buang (*discharged burn up*) maksimum di akhir siklus adalah $< 70\%$ *burnup*
- Reaktivitas lebih akhir siklus $> 2,0$ % $\Delta k/k$
- Reaktivitas total target $< 2,0$ % $\Delta k/k$

Parameter yang dihitung dalam mencapai teras setimbang silisida 4,8 gU/cm³ melalui teras campuran adalah :

- Harga reaktivitas lebih teras pada saat awal siklus (*BOC*) dingin bebas xenon
- Margin padam pada awal siklus saat BOC
- Fraksi bakar buang maksimum
- Faktor puncak daya radial maksimum
- Fluks neutron cepat dan termal

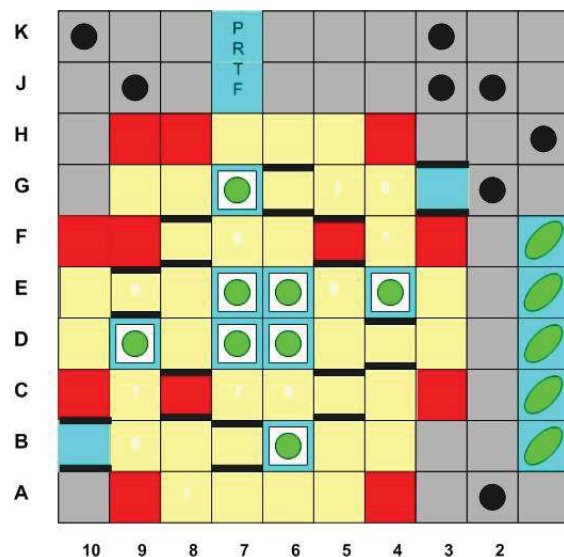
HASIL DAN PEMBAHASAN

Perhitungan parameter neutronik melalui konversi teras campuran silisida dari $2,96 \text{ gU/cm}^3$ – $4,8 \text{ gU/cm}^3$ dilakukan dengan menggunakan paket program Batan-2DIFF yang merupakan bagian dari paket program Batan-FUEL dengan dua cara yaitu konversi langsung dan konversi tidak langsung. Kedua cara perhitungan tersebut dilakukan dengan pembatasan fraksi bakar buang maksimum $< 70 \text{ burnup}$ dan reaktivitas teras di akhir siklus dalam kondisi panas xenon, samarium setimbang $> 2,0 \% \Delta k/k$.

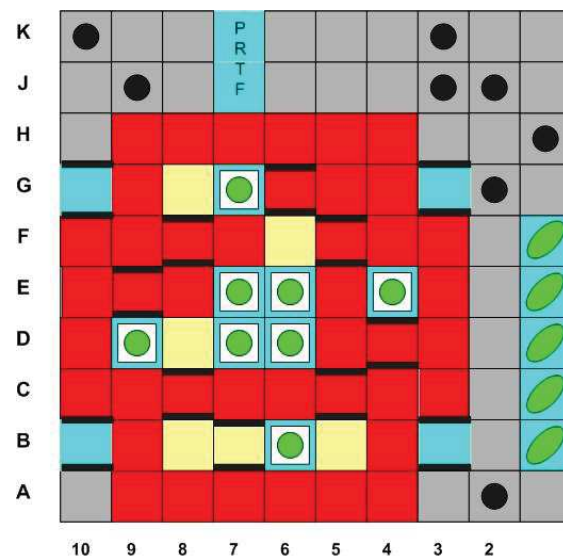
Konversi Langsung

Konversi langsung dilakukan dengan perhitungan teras dimulai teras setimbang silisida $2,96 \text{ gU/cm}^3$. Teras setimbang ini mempunyai panjang siklus 21,80 hari atau setara dengan energi yang dibangkitkan sebesar 654 MWd. Pengaturan panjang siklus ini dilakukan agar dapat menghasilkan reaktivitas lebih di awal siklus yang cukup, reaktivitas lebih di akhir siklus, fraksi bakar buang maksimum dan margin padam yang memenuhi batasan operasi reaktor. Fraksi bakar teras setimbang silisida $2,96 \text{ gU/cm}^3$ menurut batasan operasi yang diijinkan oleh Bapeten adalah $< 60\%$, sedangkan fraksi bakar untuk tingkat muat yang lebih tinggi menurut batasan hasil penelitian elemen bakar adalah $< 70 \%$. Dengan mengikuti langkah pemuatan bahan bakar sesuai pola *reshuffle*, maka di setiap awal siklus dimasukkan 5 elemen bahan bakar standar dan satu bahan bakar kendali segar silisida $4,8 \text{ gU/cm}^3$. Lima bahan bakar standar dan satu bahan bakar kendali silisida $2,96 \text{ gU/cm}^3$ yang sudah mencapai fraksi bakar buang maksimum dikeluarkan dari teras reaktor. Langkah ini dilakukan setiap teras campuran mulai dari teras campuran 1 sampai dengan teras campuran 8, sehingga di teras campuran 8 seluruh teras sudah terisi seluruhnya oleh bahan bakar silisida $4,8 \text{ gU/cm}^3$.

Pada teras campuran ini terdapat 2 model konfigurasi teras yaitu pada langkah ke 2-a dan langkah 7-a seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10 dan 11.



Gambar 10. Teras campuran 2 dengan 2 BKP



Gambar 11. Teras campuran 7 dengan 4 BKP

Hasil perhitungan berupa nilai reaktivitas lebih, fraksi bakar maksimum di akhir siklus dan margin padam pada pembentukan teras silisida $4,8$ melalui teras campuran silisida $2,96 \text{ gU/cm}^3$ – $4,8 \text{ gU/cm}^3$ sampai terbentuknya teras penuh silisida $4,8 \text{ gU/cm}^3$ dengan konversi langsung ditunjukkan pada Tabel 3.

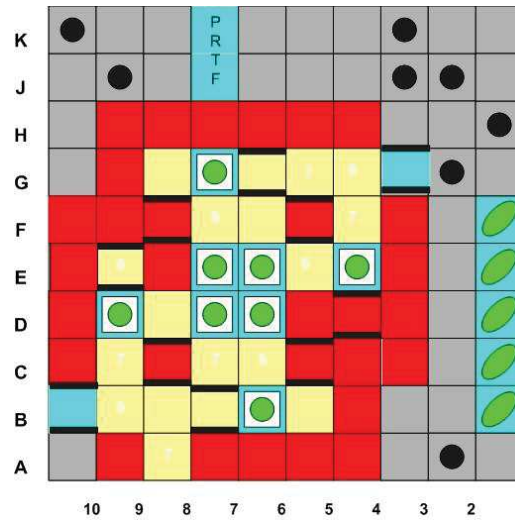
Tabel 3. Hasil perhitungan konversi langsung teras campuran silisida 2,96 g U/cm³ - 4,8 g U/cm³ pada daya 30 MW

| Langkah | Pemuatan bahan bakar Si 4.8 gU/cm ³ (EBS s/EBK) | Reaktivitas lebih BOC (%Δk/k) | Fraksi bakar buang maksimum (%Δk/k) | Panjang siklus (hari) | Margin padam minimum (%Δk/k) | Keterangan |
|---------|--|-------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|------------------------------|----------------------------------|
| 0 [2] | - | 9,70 | 56,00 | 21,80 | -1,30 | Semua Si 2,96 gU/cm ³ |
| 1 | 5/1 | 9,98 | 61,75 | 30,00 | -0,70 | |
| 2 | 10/2 | 10,37 | - | - | -0,05 | Tidak aman |
| 2-a. | 10/2 | 9,56 | 59,75 | 25 | -4,28 | 2 BKP |
| 3 | 15/3 | 10,38 | 62,52 | 35 | -3,47 | |
| 4 | 20/4 | 11,47 | 66,33 | 39 | -3,36 | |
| 5 | 25/5 | 11,30 | 69,12 | 40 | -2,76 | |
| 6 | 30/6 | 11,23 | 69,90 | 38 | -2,07 | |
| 7 | 35/7 | 11,42 | 69,75 | - | -0,02 | Tidak aman |
| 7-a | 35/7 | 12,60 | 69,79 | 30 | -1,878 | 4 BKP |
| 8 | 40/8 | 14,19 | 69,75 | 40 | -0,056 | Tidak aman |

Pada Tabel 3 dapat dilihat bahwa langkah ke 0 merupakan teras setimbang silisida 2,96 gU/cm³. Pada langkah ke 2, dimana 10 elemen bakar dan 2 elemen bakar silisida 4,8 gU/cm³ dengan fraksi bakar rendah berada dalam teras reaktor bersama dengan silisida 2,96 gU/cm³ dengan fraksi bakar tinggi, dihasilkan nilai margin padam sebesar -0,05 %Δk/k, yang berarti margin padam tersebut tidak terpenuhi karena melebihi batasan operasi (<-0,5%Δk/k) sehingga perhitungan reaktivitas di akhir siklus tidak dilakukan. Agar margin padam dapat terpenuhi, maka perlu ditambahkan 2 buah BKP yang diletakkan pada posisi teras G-10 dan B-3 seperti yang ditunjukkan pada langkah ke 2-a, Gambar 10. Dalam perhitungan, penambahan 2 buah BKP ini dapat dipertahankan sampai langkah ke 6, karena pada langkah ke 7, margin padam yang dihasilkan sebesar -0,02 %Δk/k yang berarti syarat batasan operasi tidak terpenuhi juga, sehingga perlu ditambahkan lagi 2 buah BKP yang diletakkan pada posisi B-10 dan G-3 dan dilakukan perhitungan dengan langkah ke 7-a, Gambar 11. Pada langkah ke 8, dimana seluruh teras sudah termuati dengan bahan bakar 4,8 gU/cm³, margin padam juga tidak memenuhi kriteria, sehingga perhitungan dihentikan dengan anggapan model teras campuran dengan konversi langsung dari silisida 2,96 gU/cm³ ke 4,8 gU/cm³ tidak dapat dilanjutkan, sehingga perlu dilakukan perhitungan dengan model teras campuran dengan konversi tidak langsung.

Konversi Tidak Langsung

Konversi tidak langsung dilakukan melalui dua tahap perhitungan teras campuran yaitu tahap pertama adalah teras campuran 2,96 gU/cm³ – 3,55 gU/cm³ dan tahap ke dua 3,55 gU/cm³ – 4,8 gU/cm³. Dengan menggunakan pola pergeseran bahan bakar (*reshuffle*) 5/1, pada tahap pertama yaitu teras campuran 2,96 gU/cm³ – 3,55 gU/cm³ dilakukan sampai seluruh teras berisi bahan bakar silisida 3,55 gU/cm³. Tahap ke dua dilanjutkan dengan konversi teras dari teras silisida 3,55 gU/cm³ – 4,8 gU/cm³ dengan cara yang sama dengan tahap pertama. Langkah ini dilakukan sampai seluruh teras berisi bahan bakar silisida 4,8 gU/cm³. Parameter neutronik yang dihasilkan dari perhitungan teras campuran tidak langsung ditunjukkan pada Tabel 4 dan Tabel 5. Pada langkah ini terdapat dua teras campuran yang memerlukan penambahan BKP yaitu pada teras campuran seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11 dan 12.



Gambar 12. Teras campuran 5 dengan 2 BKP

Tabel 4. Perhitungan konversi tidak langsung I teras campuran silisida $2,96 \text{ gU/cm}^3 - 3,55 \text{ gU/cm}^3$ pada daya 30 MW

| | | | | | | |
|-------|------|-------|-------|-------|-------|---------------------------------|
| | | | | | | |
| 0 [2] | - | 9,70 | 56,00 | 21,80 | -1,30 | Semua Si $2,96 \text{ gU/cm}^3$ |
| 1 | 5/1 | 9,64 | 57,97 | 24,17 | -5,65 | |
| 2 | 10/2 | 9,82 | 58,67 | 25,83 | -4,27 | |
| 3 | 15/3 | 9,89 | 59,98 | 27,33 | -4,22 | |
| 4 | 20/4 | 9,93 | 61,50 | 27,67 | -4,25 | |
| 5 | 25/5 | 9,98 | 62,87 | 28,67 | -3,95 | |
| 6 | 30/6 | 10,18 | 64,67 | 31,33 | -3,76 | |
| 7 | 35/7 | 10,18 | 67,58 | 32,00 | -3,34 | |
| 8 | 40/8 | 9,97 | 66,50 | 30,00 | -3,82 | Semua Si $3,55 \text{ gU/cm}^3$ |

Pada teras campuran tidak langsung I ini, langkah ke 0 pada Tabel 4 merupakan data teras setimbang silisida $2,96 \text{ gU/cm}^3$. Nilai reaktivitas lebih teras di akhir siklus dipertahankan dalam kondisi panas xenon setimbang $>2,0 \text{ \%}\Delta k/k$ dan fraksi bakar di akhir siklus dibatasi $<70\%$. Pada Tabel 4 dapat dilihat bahwa untuk mencapai teras penuh berbahan bakar silisida $3,55 \text{ gU/cm}^3$ dapat dilakukan sampai langkah ke delapan tanpa diperlukan penambahan BKP, karena semua batasan yang disyaratkan terpenuhi.

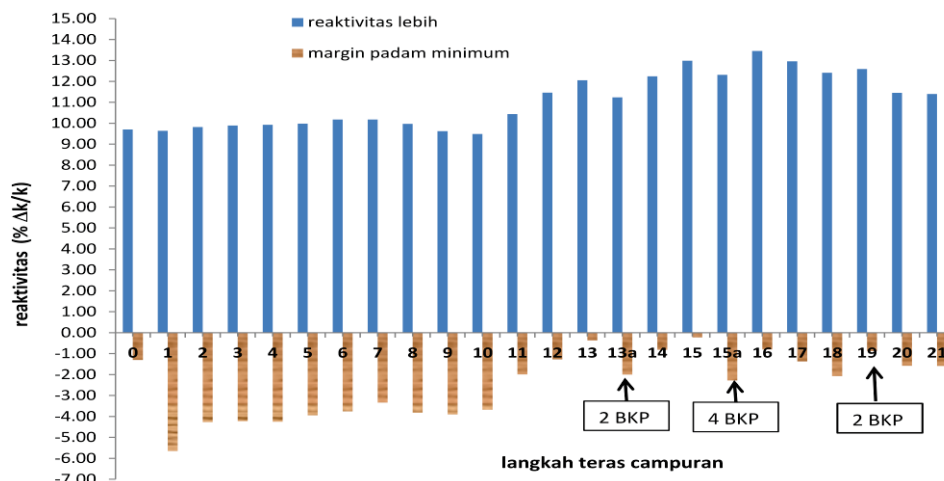
Tabel 5. Perhitungan konversi tidak langsung II teras campuran silisida $3,55 \text{ gU/cm}^3 - 4,8 \text{ gU/cm}^3$ pada daya 30 MW

| | | | | | | |
|------|------|-------|-------|-------|-------|---------------------------------|
| | | | | | | |
| 8 | - | 9,97 | 66,50 | 30,00 | -3,82 | Semua Si $3,55 \text{ gU/cm}^3$ |
| 9 | 5/1 | 9,62 | 69,99 | 40,00 | -3,90 | |
| 10 | 10/2 | 9,49 | 69,73 | 30,00 | -3,68 | |
| 11 | 15/3 | 10,44 | 69,24 | 30,00 | -1,99 | |
| 12 | 20/4 | 11,46 | 69,89 | 33,33 | -1,27 | |
| 13 | 25/5 | 12,05 | - | - | -0,37 | Tidak aman |
| 13-a | 25/5 | 11,24 | 69,97 | 35,00 | -2,00 | 2 BKP |

| | | | | | | |
|------|------|-------|-------|-------|-------|------------|
| 14 | 30/6 | 12,24 | 69,92 | 36,67 | -0,82 | |
| 15 | 35/7 | 12,99 | - | - | -0,22 | Tidak aman |
| 15-a | 35/7 | 12,31 | 69,98 | 33,33 | -2,28 | 4 BKP |
| 16 | 40/8 | 13,45 | 62,76 | 46,67 | -0,80 | |
| 17 | 40/8 | 12,96 | 63,03 | 46,67 | -1,38 | |
| 18 | 40/8 | 12,42 | 64,70 | 46,67 | -2,07 | |
| 19 | 40/8 | 12,59 | 68,79 | 46,67 | -0,88 | 2 BKP |
| 20 | 40/8 | 11,46 | 69,90 | 43,33 | -1,58 | |
| 21 | 40/8 | 11,40 | 69,95 | 40,00 | -1,59 | |

Tabel 5 menunjukkan hasil perhitungan teras campuran tidak langsung tahap kedua yang dimulai dengan perhitungan teras berisi bahan bakar silisida $3,55 \text{ gU/cm}^3$ pada langkah ke 8. Nilai reaktivitas lebih awal siklus akan bertambah tinggi sebanding dengan bertambahnya massa bahan bakar dalam teras sehingga untuk menurunkan reaktivitas lebih agar tidak terlalu tinggi, maka panjang siklus dapat diperpanjang dengan mempertahankan fraksi bakar buang maksimum $<70\%$. Margin padam pada langkah 13 kecil yaitu $-0,37 \text{ \%}\Delta k/k$ ($< -0,5 \text{ \%}\Delta k/k$) yang berarti reaktor tidak dapat subkritis, dikarenakan jumlah bahan bakar silisida $4,8 \text{ gU/cc}$ yang semakin banyak. Oleh karena itu diperlukan penambahan BKP yang akan menaikkan kembali nilai margin padam reaktor.

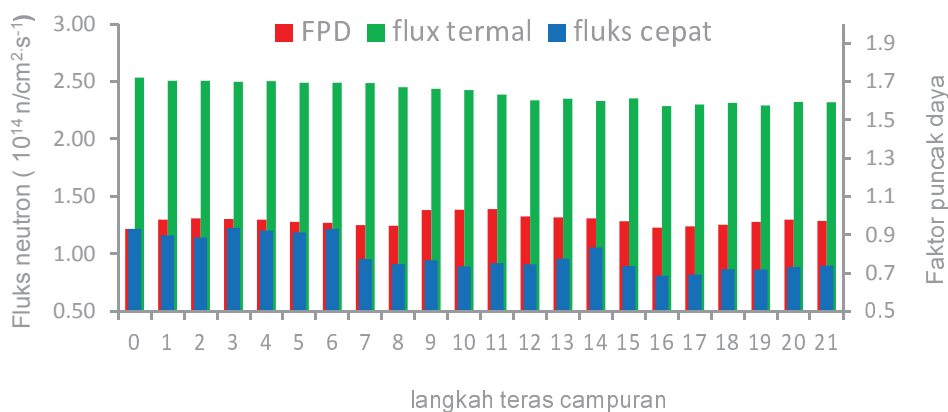
Pada langkah ke 13a seperti yang ditunjukkan pada Gambar 12, setelah penambahan 2 buah BKP, margin padam naik menjadi $-0,8 \text{ \%}\Delta k/k$. Penggunaan 2 buah BKP ini dapat dipertahankan sampai langkah ke 14. Pada langkah ke 15 margin padam tidak terpenuhi, sehingga perlu ditambah 2 buah BKP lagi menjadi 4 buah BKP seperti pada langkah 13 a, konfigurasi seperti pada Gambar 11 . Pada langkah ke 15a, nilai margin padam naik menjadi $-2,28 \text{ \%}\Delta k/k$ yang berarti memenuhi batasan desain. Penggunaan 4 buah BKP ini dapat menghasilkan margin padam yang cukup sampai teras penuh dimana seluruh teras telah terisi bahan bakar silisida $4,8 \text{ gU/cm}^3$. Penggunaan 4 buah BKP dianggap kurang ekonomis, sehingga jumlah BKP perlu dikurangi dengan mempertahankan nilai margin padam $<-0,5 \text{ \%}\Delta k/k$. Pada langkah ke 19 atau langkah ke 4 setelah mencapai teras penuh silisida $4,8 \text{ gU/cm}^3$, jumlah BKP dapat dikurangi menjadi 2 buah BKP dan dapat menghasilkan margin padam sebesar $-0,88 \text{ \%}\Delta k/k$, sehingga langkah ini dapat dilanjutkan dengan penggunaan 2 buah BKP dan dianggap teras silisida $4,8 \text{ gU/cm}^3$ sudah setimbang. Nilai reaktivitas lebih awal siklus setiap teras campuran serta margin padam minimum disajikan dalam Gambar 13.



Gambar 13. Reaktivitas dan margin padam minimum teras campuran

Dari grafik yang disajikan pada Gambar 13 dapat dilihat bahwa margin padam pada Teras 12 rendah yaitu 0-1,27 % $\Delta k/k$ dan menurut data pada Tabel 13, pada langkah ke 13, nilai margin padam pada langkah tersebut tidak memenuhi batasan desain, maka perlu ditambahkan 2 buah BKP sehingga dapat menaikkan margin padam menjadi -2,00 % $\Delta k/k$ (langkah 13a). Langkah yang tidak memenuhi batasan desain berikutnya pada langkah ke 15, kemudian ditambahkan 2 buah BKP lagi sehingga terdapat 4 buah BKP, maka pada langkah 15a, margin padam terpenuhi.

Selain nilai reaktivitas, dari hasil perhitungan juga dapat diketahui besarnya faktor puncak daya, fluks neutron cepat dan neutron termal. Nilai fluks neutron cepat, neutron termal dan faktor puncak daya teras campuran disajikan pada Gambar 14,



Gambar 14. Faktor puncak daya, fluks neutron cepat dan fluks neutron termal teras campuran

Nilai fluks neutron, dan faktor puncak daya yang disajikan pada Gambar 14 merupakan nilai fluks maksimum radial di teras reaktor. Terlihat bahwa semakin besar massa bahan bakar di dalam teras reaktor, maka fluks neutron termal akan mengalami penurunan. Berdasarkan persamaan (2 - 6) yang menunjukkan bila daya reaktor (P) dan volume teras (V) konstan, sedangkan kerapatan bahan bakar bertambah, maka tampang lintang makroskopik (Σ_f) menjadi lebih besar, maka fluks neutron termal akan menjadi lebih kecil. sementara fluks neutron cepat akan mengalami kenaikan akibat dari spektrum neutron semakin keras pada tingkat muat uranium yang lebih tinggi. Nilai faktor puncak daya yang tertinggi pada posisi teras tertentu terletak pada Teras ke 9. dimana pada teras ini kondisi teras belum merata dikarenakan bahan bakar dengan muatan yang lebih tinggi belum banyak yang masuk. Hasil analisis di atas menunjukkan bahwa konversi teras silisida 2,96 gU/cm³ menuju teras setimbang silisida 4,8 gU/cm³ dapat dilakukan melalui konversi teras tidak langsung.

KESIMPULAN

Konversi bahan bakar reaktor RSG-GAS ke tingkat muat tinggi 4,8 gU/cm³ yang dapat dilakukan adalah melalui teras campuran tidak langsung silisida 2,96 gU/cm³ - 3,55 gU/cm³ dan teras campuran silisida 3,55 gU/cm³ - 4,8 gU/cm³. Pencapaian teras setimbang melalui teras campuran ini diperlukan 4 buah batang kendali pengaman (BKP) sehingga kriteria keselamatan dapat terpenuhi. Penggunaan 4 buah BKP pada teras setimbang silisida 4,8 gU/cm³ dapat dikurangi menjadi 2 buah BKP setelah teras setimbang beroperasi 4 siklus berikutnya. Keuntungan utama dari penggunaan bahan bakar silisida tingkat muat tinggi 4,8 gU/cm³ dibanding bahan bakar silisida

tingkat muat rendah $2,96 \text{ gU/cm}^3$ pada teras RSG-GAS ialah panjang siklus operasi dapat diperpanjang dari 22 hari menjadi 40 hari sehingga dapat menghemat penggunaan bahan bakar.

DAFTAR PUSTAKA

1. Anonim. Laporan Analisis Keselamatan RSG-GAS bab V-Reaktor, Revisi 10, BATAN. 2008. p: V41-46
2. Surian Pinem, Tukiran Surbakti, Jati Susilo. Pengukuran parameter kinetik teras silisida dengan kerapatan $2,96 \text{ gU/cc}$ reaktor RSG-GAS. Jurnal Fisika Himpunan Fisika Indonesia 2004;A4: 021801 - 06
3. Lily Suparlina dan Jati Susilo. Evaluasi Manajemen Teras Reaktor RSG-GAS Berdasarkan Perhitungan Fraksi Bakar. Prosiding PPI-PDIPTN; 2009 p: 131-136
4. Lily Suparlina. Analisis Peningkatan Fraksi Bakar Buang Untuk Efisiensi Penggunaan Bahan Bakar $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ $2,96 \text{ gU/cc}$ di Teras RSG-GAS. Prosiding PPI-PDIPTN. 2010 p: 176-182
5. Liem P.H, Bakri Arbie, T.M. Sembiring, P. Prayoto, R. Nabbi. Fuel management strategy for the new equilibrium silicide core design of RSG GAS(MPR-30). Nuclear Engineering and Design. 1998;180(3): 207-219
6. Jati Susilo, Analisis pola pemuatan bahan bakar teras setimbang RSG-GAS berbahan bakar $\text{U}_3\text{Si-Al}$ kerapatan $3,55 \text{ gU/cc}$, Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir Tri Dasa Mega. 2007; 9(2):75-85
7. Lily Suparlina, T.M. Sembiring. Application of Neutron Diffusion Theory for High Uranium Density Fueled Reactor Core Calculation, Asian Physics Symposium Proceedings. 2005; p: 332-337
8. Lily Suparlina. Analysis of hot spot factor for Silicide 4.8 gU/Cc RSG-GAS Core. Proceedings of The International Conference on Mathematics and Natural Sciences (ICMNS). 2006; p:1065-68
9. Surian Pinem, Tagor MS, Setiyanto. Analisis transient teras reaktor RSG-GAS pada saat laju alir pendingin turun dengan menggunakan program MTR-DYN. Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir Tri Dasa Mega. 2009; 11(3):153-161
10. Setiyanto, T.M. Sembiring, S. Pinem, L. Suparlina. Neutronic analysis of the RSG-GAS silicide core with uranium density of 4.8 g/cc . IAEA Publication International Conference on research Reactors Safe Management and Effective Utilization, IAEA-CN-156, STI/PUB/1360 ISBN 978-92-0-160108-7 ISSN 1991-2374 Vienna; 2008.
11. Peng Hong Liem and, Tagor Malem Sembiring. Design of transition cores of RSG GAS (MPR-30) with higher loading silicide fuel. Journal of Nuclear Engineering and Design. 2010 6: 1433-1442
12. Ahmad Lashkari, Hossein Khalafi, S. Mohammad Mirvakili, Shokufe Foroghi. Neutronic analysis for Tehran Research Reactor mixed-core. Progress in Nuclear Energy. 2012; 60: 31-37.
13. M. Keyvani, M. Arkani, A. Hossni Rokh. Optimization of in-core fuel management strategy of Tehran Research Reactor (TRR) using MCNP-4C. Annals of Nuclear Energy. 2010; 37: 1683-1687
14. IAEA. WIMS-D Library Update. IAEA, Vienna, 2007
15. Liem P.H. Batan-FUEL: A general in-core fuel management code. Journal Atom Indonesia, July 1996 22;2:67-80