

KARAKTERISTIKA TERAS RSG-GAS DENGAN BAHAN BAKAR SILISIDA

Purwadi

Pusat Reaktor Serba Guna - BATAN

ABSTRAK

KARAKTERISTIKA TERAS RSG-GAS DENGAN BAHAN BAKAR SILISIDA. RSG-GAS sudah beroperasi 30 tahun sejak kritis pertama tahun 1987. Pada desain awal RSG-GAS menggunakan bahan bakar uranium oksida dengan pengayaan rendah. Pada tahun 1996, bahan bakar RSG-GAS diganti menjadi uranium silisida dengan pengayaan dan densitas yang sama yaitu 19,75 % dan 2,96 gU/cm³. Selanjutnya dilakukan pengkajian untuk penggantian bahan bakarnya dengan jenis yang sama namun densitasnya ditingkatkan menjadi 3,55 gU/cm³. Kini ada kemungkinan juga dilakukan penggantian menjadi uranium molybdenum dengan densitas 3,55 gU/cm³. Dalam makalah ini akan dibahas karakteristik teras reaktor RSG-GAS dengan material bahan bakar yang berbeda namun pengayaan dan densitas yang sama. Pengujian karakteristik teras reaktor dilakukan berdasarkan hasil perhitungan maupun eksperimen yang ada. Dari hasil pengujian diperoleh karakteristiknya bahwa untuk teras RSG-GAS dengan bahan bakar uranium oksida dengan densitas 2,96 gU/cm³ dan uranium silisida dan molybdenum dengan densitas 3,55 gU/cm³ memiliki parameter kinetik yang relatif sama namun parameter neutroniknya berbeda. Dari hasil kajian ini diperoleh kesimpulan bahwa karakteristik teras RSG-GAS sangat dipengaruhi oleh jenis bahan bakarnya.

Kata kunci: karakteristik teras, bahan bakar silisida, reaktor RSG-GAS, parameter neutronik

ABSTRACT

CHARACTERISTIC OF THE RSG-GAS CORE USING SILICIDE FUEL. RSG-GAS has been operating for 30 years since the first criticality in 1987. In the early design, RSG-GAS used uranium oxide fuels with low enrichment. In 1996, the fuel was changed to become uranium silicide with the similar enrichment and density of 19,75 % and 2,96 gU/cm³, respectively. After that, an assessment has been conducted to change the fuel of RSG-GAS reactor with the same composition but with the increased density of 3.55 gU/cm³. Right now, the assessment also is being conducted for uranium molybdenum fuel with density of 3.55 gU/cm³. This paper will discuss characteristics of the RSG-GAS core using different fuel types but with the same density and enrichment. The characteristics of the RSG-GAS is obtained from calculations and available experiment results. Results of assessment show that the characteristics of RSG-GAS core with 2.96 gU/cm³ of density for uranium oxide and 3.55 gU/cm³ of density for uranium silicide and molybdenum have relatively similar kinetics parameters but different neutronic parameters. Therefore, it is concluded that characteristics of RSG-GAS core depend on its fuel types.

Keywords: core characteristic, silicide fuel, RSG-GAS reactor, neutronic parameter

PENDAHULUAN

Reaktor riset di dunia didesain untuk memperoleh fluks neutron termal yang tinggi sehingga dapat digunakan untuk memproduksi radioisotop. Dalam perjalanannya reaktor riset seperti RSG-GAS akan selalu menggunakan bahan bakar yang terbaik, ekonomis dan mengutamakan faktor keselamatan sesuai perkembangan teknologi. Reaktor RSG-GAS didesain dengan bahan bakar pengkayaan rendah 19,75 % untuk mengurangi resiko proliferasi atau diversi bahan bakar reaktor menjadi senjata nuklir. Pengkayaan rendah membuat umur bahan bakar di dalam teras reaktor riset tipe pelat seperti RSG-GAS terlalu singkat atau panjang siklusnya pendek dimana akan berpengaruh kepada menurunnya tingkat efektivitas dan efisiensi reaktor dalam operasinya sehingga faktor ekonomisnya menurun. Salah satu cara untuk meningkatkan nilai ekonomis reaktor riset seperti RSG-GAS adalah dengan meningkatkan densitas bahan bakarnya. Namun sebelum mengganti bahan bakar reaktor tersebut dengan densitas yang lebih tinggi, terlebih dahulu harus dilakukan beberapa kajian dan perhitungan neutronik untuk mengevaluasi parameter keselamatannya.

Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy (RSG-GAS) pada awalnya didesain dengan bahan bakar uranium oksida dan pada saat ini dioperasikan dengan bahan bakar uranium silisida kerapatan $2,96 \text{ gU/cm}^3$. Pergantian bahan bakar ini dipandang karena bahan bakar silisida dianggap lebih baik dari oksida. Penelitian saat ini juga dilakukan kemungkinan untuk pergantian bahan bakar dengan densitas

yang lebih tinggi. Untuk teras RSG-GAS yang merupakan reaktor riset jenis MTR (*Material Testing Reactor*) bahan bakar silisida atau molybdenum jatuh pilihan pada densitas $3,55 \text{ gU/cm}^3$ ^[1]. Keuntungan menggunakan bahan bakar uranium silisida atau molybdenum dengan densitas tinggi adalah dapat memperpanjang siklus operasi dengan demikian mengurangi jumlah bahan bakar di dalam teras untuk mencapai energi yang sama sehingga lebih ekonomis. Untuk teras dengan densitas tinggi secara neutronik dan kinetik perlu dianalisis sebelum dilakukan konversi bahan bakar ke densitas lebih tinggi namun dalam penelitian ini difokuskan untuk menganalisis karakteristik teras RSG-GAS dengan bahan bakar yang berbedayaitu uranium oksida, uranium silisida dan uranium molybdenum. Dalam analisis ini dilakukan pengujian berdasarkan parameter neutronik dan kinetik yang berdasarkan hasil perhitungan maupun eksperimen. Parameter neutronik dan kinetik sangat penting untuk dianalisis karena sangat berhubungan dengan keselamatan reaktor, khususnya bila terjadi transien dan ekskursi daya, sehingga perlu dilakukan perhitungan yang akurat dengan memperhitungkan beberapa nuklida dapat belah yang terjadi pada teras reaktor.

Dari evaluasi diharapkan bahwa karakteristik teras RSG-GAS pada densitas $2,96 \text{ gU/cm}^3$ dengan jenis bahan bakar silisida lebih baik apalagi jika dinaikkan densitannya menjadi $3,55 \text{ gU/cm}^3$.

DESKRIPSI TERAS DAN BAHAN BAKAR RSG-GAS

Teras RSG-GAS

RSG-GAS merupakan reaktor jenis MTR (*Material Testing Reactor*) dengan fluks neutron rerata 2×10^{14} n/cm²s. Karena fluks neutron yang tinggi maka teras RSG-GAS digunakan untuk produksi radioisotop, iradiasi perangkat bahan bakar reaktor daya, analisis aktivasi neutron dan uji tidak merusak. Fasilitas iradiasi yang dimiliki teras RSG-GAS adalah CIP (*Central Irradiation Position*), IP (*Irradiation Position*) *Rabbit System*, PRTF (*Power Ramp Test Facility*), tabung berkas neutron dan NTD (*neutron transmutation doping*)^[2], seperti ditunjukkan pada Gambar 1.

Bahan Bakar RSG-GAS

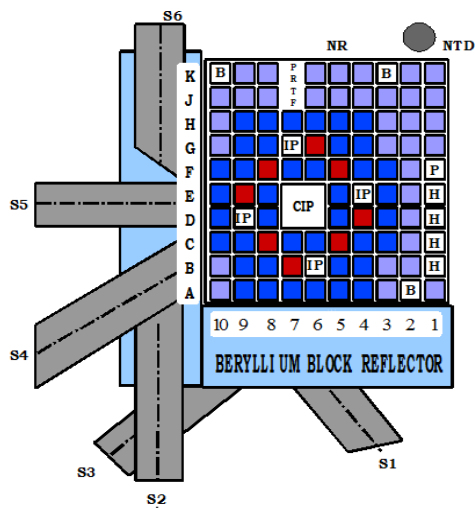
Pemilihan bahan bakar RSG-GAS dengan densitas lebih tinggi sebagai bahan bakar alternatif adalah untuk memperpanjang siklus operasi. Disamping itu bahan bakar ini juga diharapkan mempunyai penghantar panas yang baik dibanding bahan bakar oksida. Berdasarkan peneliti sebelumnya maka pilihan jatuh pada bahan bakar silisida dengan kerapatan $3,55$ gU/cm³^[3]. Pada saat ini kerapatan uranium silisida yang dipakai reaktor RSG-GAS adalah $2,96$ g/cm³, sehingga memungkinkan untuk meningkatkan panjang siklus operasi yang signifikan dengan bahan bakar uranium silisida atau molibdenum. Sedangkan

keuntungan kedua adalah bahan bakar silisida atau molybdenum dapat dibakar sampai fraksi bakar ~ 70 %^[4]. Bahan bakar silisida sudah teruji baik secara fabrikasi maupun operasinya sangat handal tidak ada masalah yang signifikan dan sudah banyak digunakan di reaktor riset di dunia, sedangkan bahan bakar molybdenum masih dalam tahap penelitian dan belum ada yang digunakan dalam operasi reaktor riset. Namun dalam hal ini RSG-GAS juga sedang menguji bahan bakar mini uranium molybdenum di teras RSG-GAS.

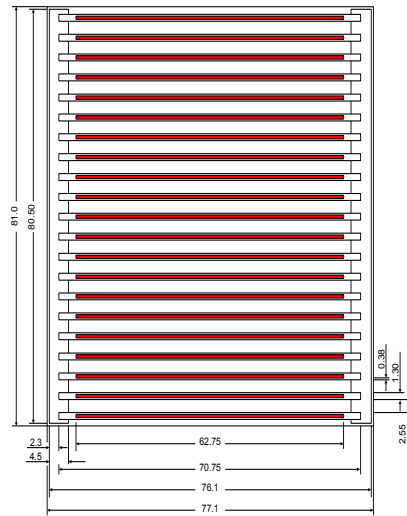
Beberapa reaktor riset di dunia yang menggunakan bahan bakar uranium silisida juga sudah menggunakan densitas tinggi seperti reaktor riset Jepang (JMTR) menggunakan silisida $4,8$ gU/cm³, reaktor riset Cina (CARR) menggunakan silisida $4,3$ gU/cm³, reaktor riset HFR di Petten menggunakan silisida $4,8$ gU/cm³ dan reaktor riset di Australia (OPAL) menggunakan silisida $4,8$ gU/cm³. Reaktor riset CRCN di Brazil dan MPRR adalah reaktor riset di India densitasnya $4,8$ gU/cm³ sedangkan RSG-GAS masih $2,96$ gU/cm³. Selanjutnya data teras dan bahan bakar beberapa reaktor riset di dunia disajikan pada Tabel 1. Teras dan konfigurasi bahan bakar RSG-GAS dapat dilihat pada Gambar 1 dan bentuk dan ukuran bahan bakar pada Gambar 2 sedangkan bentuk dan ukuran batang kendali pada Gambar 3.

Tabel 1. Parameter berbagai jenis teras reaktor riset ^[5]

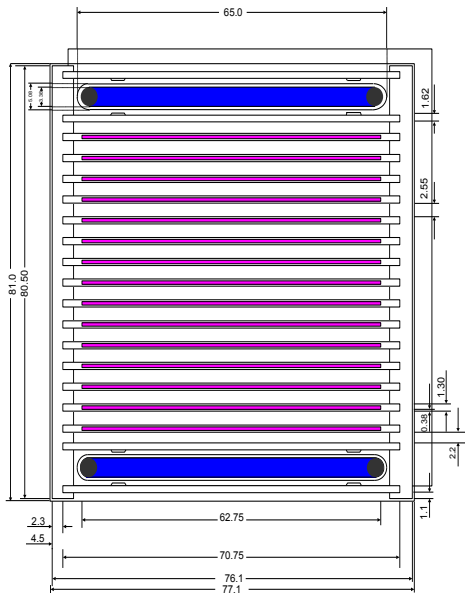
| Parameter | Nama Reaktor | | | | | | |
|---|------------------------|---------------------|-------------------------|-------------------|----------------------|------------------|----------------------|
| | JMTR | CARR | HFR | OPAL | CRCN | MPRR | RSG-GAS |
| Jenis | Tank | Tank | Tank | Open pool | Open pool | Open pool | Open pool |
| Pendingin | H ₂ O | H ₂ O | H ₂ O | H ₂ O | H ₂ O | H ₂ O | H ₂ O |
| Moderator | H ₂ O | H ₂ O | H ₂ O | H ₂ O | D ₂ O | H ₂ O | H ² O |
| Reflektor | Be, D ₂ O | D ₂ O | Be | D ₂ O | Be, D ₂ O | D ₂ O | Be |
| Daya termal (MW) | 50 | 60 | 45 | 20 | 20 | 30 | 30 |
| Fluks neutron termal rata-rata [10^{14} n/cm ² .s] | 4,0 | 4,0 | 2 | 3,82 | 4 | 6,7 | 2,5 |
| Posisi iradiasi | 28 | 25 | 42 | 17 | 19 | 23 | 8 |
| Dimensi teras (cm) | 41,6 x 41,6 x 75 | - | 72,9 x 750,4 x 60 | 35 x 35 x 61,5 | - | - | 81 x 77,1 x 60 |
| Jumlah elemen bakar | 24 | 17 | 33 | 16 | 30 | 30 | 40 |
| Jumlah batang kendali | 5 | 4 | 6 | 5 | 8 | 6 | 8 |
| Tinggi elemen bakar (mm) | 750 | 850 | 600 | 700 | 700 | | 625 |
| Densitas U ₃ Si ₂ -Al [gram/cm ³] | 4,8 | 4,3 | 4,8 | 4,8 | 4,8 | 4,8 | 2,96 |
| Pengkayaan (%) | 20 | 20 | 19,75 | 19,75 | 20 | 19,75 | 19,75 |
| Jumlah pelat elemen bakar | 19 | 21 | 20 | 21 | 19 | 20 | 21 |
| Jumlah pelat elemen bakar | 16 | - | 17 | - | - | 14 | 15 |
| Dimensi elemen bakar(mm) | 76,2 x 1.200 | 76,2 x 76,2 | 81 x 77 | 80,5 x 80,5 | 80 x 80 | 85,6 x 85,6 | 81 x 77,1 |
| Tebal <i>meat</i> (mm) | 0,51 | 0,6 | 0,76 | 0,61 | 0,7 | 0,6 | 0,54 |
| Panjang <i>meat</i> (mm) | 760 | 850 | 600 | 615 | 700 | 600 | 600 |
| Lebar <i>meat</i> (mm) | 61,6 | 61,6 | 65 | 65 | 80 | 68,9 | 62,75 |
| Tebal kelongsong (mm) | 0,38 | 0,38 | 0,38 | 0,37 | 0,4 | 0,4 | 0,38 |
| Jarak antar pelat (mm) | 2,59 | 2,59 x 2 2,57 x2 | - | - | 2,7 | 2,3 | 2,55 |
| Absorber | Hf | Hf | Cd | Hf | Ag- InCd | Hf | AginCd |
| Racun dapat bakar | Kawat Cd | BKP | | Kawat Cd | | BKP | - |



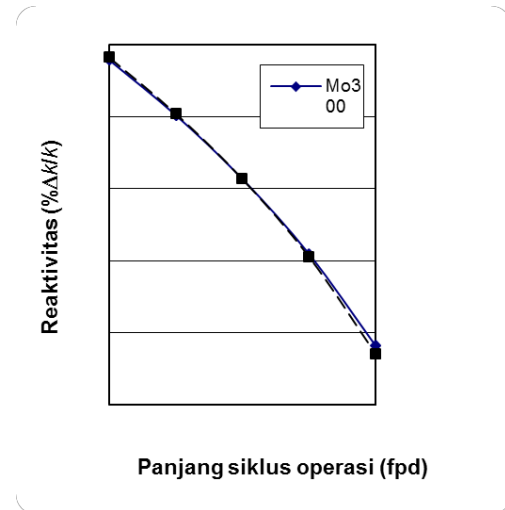
Gambar 1. Teras RSG-GAS dan fasilitasnya [6]



Gambar 2. Bahan bakar RSG-GAS [6]



Gambar 3. Elemen kendali RSG-GAS [6]



Gambar 4. Reaktivitas vs panjang siklus [7]

METODOLOGI

Kajian dilakukan pada teras RSG-GAS dengan berbagai jenis dan densitas bahan bakar dengan mengumpulkan data data teras baik dari hasil perhitungan neutronik, kinetika reaktor, termohidraulik dan hasil eksperimen. Dari hasil

perhitungan dan eksperimen yang pernah dilakukan maka hasil analisis dapat dibandingkan dengan parameter hasil desain yang ada di dalam SAR RSG-GAS.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Parameter Neutronik RSG-GAS

Parameter neutronik RSG-GAS dibandingkan berdasarkan spesifikasi teras untuk berbagai macam tipe bahan bakar seperti ditunjukkan pada Tabel 2. Bahan bakar oksida dan silisida mempunyai densitas $2,96 \text{ gU/cm}^3$ menyatakan kandungan Uraniumnya per perangkat 250 gram sedangkan bahan bakar silisida dan molybdenum yang densitasnya $3,55 \text{ gU/cm}^3$ mengandung Uranium per perangkatnya 300 gram. Untuk densitas yang sama berarti perbedaan hanya terletak pada jenis oksida dan silisidanya. Dari segi neutronik terdapat perbedaan karakteristiknya terutama

di dalam reaktivitas lainnya. Oksida memberikan reaktivitas positif terhadap teras lebih besar dibanding silisida. Demikian juga bahan bakar silisida dan molybdenum dengan densitas yang sama yaitu $3,55 \text{ gU/cm}^3$ memberikan karakteristik neutronik yang berbeda. Jauh lebih besar reaktivitas lebih teras molybdenum dibandingkan dengan teras silisida. Hal ini menyebabkan sumbangan reaktivitas positif dari bahan bakar molybdenum terhadap teras RSG-GAS meningkat namun perlu dilakukan kajian secara kinetika dan termohidrauliknya.

Tabel 2. Spesifikasi teras RSG-GAS pada berbagai jenis bahan bakar^[8,9]

| Parameter Neutronik | Oksida 2,96 gU/cc | Silisida 2,96 gU/cc | Silisida 3,55 gU/cc | UMo 3,55 gU/cc |
|---|----------------------|------------------------|------------------------|-------------------|
| Jumlah elemen bakar | 40 | 40 | 40 | 40 |
| Jumlah Elemen kendali | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Jumlah penyerap | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Panjang siklus operasi (MWD/hari) | 614,3/20,47 | 614,6/20,48 | 975,32,2 | 900/30 |
| Fraksi bakar rerata awal siklus (% hilang ^{235}U) | 23,8 | 23,8 | 32,2 | 30,2 |
| Fraksi bakar rerata akhir siklus (% hilang ^{235}U) | 30,3 | 30,3 | 40,5 | 38,1 |
| Fraksi bakar elemen bakar maksimum (% kehilangan ^{235}U) | 52,3 | 52,3 | 68,2 | 61,5 |
| Fraksi bakar elemen kontrol maksimum (% kehilangan ^{235}U) | 56,0 | 56,0 | 71,1 | 64,8 |
| Faktor puncak daya radial maksimum | 1,23 | 1,23 | 1,27 | 1,24 |
| Parameter Kesetimbangan Reaktivitas (% $\Delta k/k$): | | | | |
| Kondisi panas ke dingin | 0,62 | 0,62 | 0,70 | 0,4 |
| Xenon setimbang | 3,66 | 3,66 | 3,70 | 4,2 |
| Perubahan fraksi bakar satu siklus | 2,48 | 2,51 | 3,77 | 3,3 |
| Eksperimen, <i>partial Xenon override</i> , dll. | 3,20 | 2,97 | 1,07 | 1,8 |
| Reaktivitas lebih teras | 9,96 | 9,76 | 9,24 | 9,70 |
| Nilai batang kendali total | -13,79 | -13,60 | -13,05 | 14,9 |
| Margin reaktivitas padam | -0,95 | -1,10 | -1,03 | 1,9 |

Parameter Kinetika Teras Setimbang RSG-GAS

Hasil perhitungan teras kerja TWC (*Typical Working Core*) atau sering disebut teras setimbang RSG-GAS disajikan pada Ta-

bel 3 yang menyatakan bahwa parameter kinetika reaktor teras setimbang RSG-GAS untuk bahan bakar oksida dan silisida tidak jauh berbeda.

Tabel 3. Parameter kinetika teras setimbang oksida dan silisida densitas 2,96gU/cc

| Parameter Kinetik | Elemen Bakar Oksida | Elemen Bakar Silisida |
|--|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Fraksi Neutron kasip Total, (b) | $7,20101 \cdot 10^{-3}$ | $7,18629 \cdot 10^{-3}$ |
| Konstanta Peluruhan Neutron Serempak Total (λ) | $7,8439 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ | $7,8434 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ |
| Umur Generasi Neutron (L) | 56,4430 ms | 58,2830 ms |
| Umur Neutron serempak (l) | 62,9699 s | 64,5126 s |
| Konstanta Peluruhan Neutron Rerata (λ) | $0,43894 \text{ s}^{-1}$ | $0,438915 \text{ s}^{-1}$ |
| Umur Neutron Efektif (t) | 12,75 s | 12,75 s |
| Konstanta Peluruhan Neutron Serempak (a) | 114,3665 | 111,3936 s |

Dari Tabel 3 di atas dapat dilihat bahwa nilai b_{eff} teras oksida $7,210 \cdot 10^{-3}$ mengalami perbedaan sedikit dan tidak signifikan dengan teras silisida densitas sama 2,96 gU/cc yaitu $7,186 \cdot 10^{-3}$. Nilai L pada teras oksida $56,44 \cdot 10^{-6}$ s lebih kecil 3,2 % dari pada silisida $58,28 \cdot 10^{-6}$ s. Hal ini disebabkan karena sigma serapan oksida lebih besar dari sigma serapan silisida sehingga membuat nilai umur generasi neutron pada teras silisida lebih besar. Dari Tabel 2 juga daterlihat untuk elemen bakar oksida dan silisida 2,96 g/cm³ harga konstanta peluruhan neutron kasip masing-masing $7,84341 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ dan $7,84088 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}$. Demikian juga parameter kinetik lainnya seperti umur neutron efektif terjadi perbedaan yang tidak signifikan. Jika dibandingkan fraksi neutron kasip total teras oksida dan silisida mempunyai perbedaan yang tidak signifikan. Nilai fraksi neutron kasip total semuanya baik teras oksida maupun silisida, awal siklus maupun akhir siklus semuanya ada dalam batas yang ditetapkan yaitu antara (6,72 -

8,00) $\times 10^{-3}$. Oleh sebab itu teras silisida dapat dioperasikan sampai saat ini.

Namun terjadi perbedaan yang mencolok pada nilai umur neutron serempak (l) sehingga mempengaruhi nilai umur generasi neutron (L). Perbedaan nilai keduanya sekitar 5,6 % lebih besar teras silisida. Hal ini dipengaruhi oleh besar tampang lintang serapan oksida dan silisida berbeda yaitu lebih besar silisida. Disamping itu juga disebabkan oleh karena adanya perbedaan kecil fraksi bakar reratanya. Fraksi bakar rerata silisida 2,96 gU/cm³ lebih kecil dari oksida 2,96 gU/cm³. Pada kondisi setimbang fraksi bakar rerata teras silisida awal siklus sebesar 23,8 % dan pada akhir teras 30,3 % sedangkan untuk teras setimbang oksida fraksi bakar rerata pada awal siklus 23,3 % dan pada akhir siklus 31,3 %. Maka dapat dikatakan bahwa lebih mudah mengontrol teras silisida dari pada teras oksida karena umur neutron serempaknya lebih besar. Teras silisida juga masih me-

mungkinkan untuk ditingkatkan muatannya dalam volume bahan bakar yang sama sehingga dilanjutkan dengan teras silisida dengan densitas bahan bakar yang lebih besar yaitu 3,55 gU/cc.

Tabel 4. menunjukkan nilai fraksi neutron kasip dan umur neutron serempak teras silisida dan molybdenum dengan densitas 3,55 gU/cm³. Nilai kedua jenis bahan bakar ini tidak berbeda

relatif sama. Hal ini disebabkan karena jumlah inti atom U-238 di dalam teras sama besar sehingga membuat nilai fraksi neutron kasip dan nilai umur neutron serempak diawal siklus sama besar. Nilai fraksi neutron kasip total untuk densitas 3,55 gU/cm³ dengan pola 5/1 awal siklus ada dalam batas yang ditetapkan yaitu $(6,72 - 8,00) \times 10^{-3}$.

Tabel 4. Harga parameter kinetik teras TWC RSG-GAS 3,55 gU/cm³

| Parameter | UMo | Silisida |
|--|-------------------------|-------------------------|
| Fraksi neutron kasip | $7,106 \times 10^{-3}$ | $7,093 \times 10^{-3}$ |
| Umur neutron serempak (s) | $62,709 \times 10^{-6}$ | $62,813 \times 10^{-6}$ |
| Konstanta Peluruhan neutron kasip (/s) | $7,849 \times 10^{-2}$ | $7,847 \times 10^{-2}$ |

Tabel 5 menyajikan nilai reaktivitas xenon antara teras oksida dan silisida. Jika dibandingkan antara teras oksida dan silisida densitas 2,96 g U/cm³ nilai reaktivitas xenon setimbang sama besar yaitu 4,06 \$. Reaktivitas puncak xenon juga sama besar yaitu 12,8 \$ serta waktu yang dibutuhkan untuk mencapai xenon puncak juga sama besar yaitu 9,82 jam. Reaktivitas peluruhan xenonnya 0,76 \$ dan

waktu mati reaktor sekitar 20 jam. Beda juga dibandingkan dengan teras silisida densitas 3,55 gU/cm³ nilai reaktivitas xenon setimbang dan puncak xenon naik sehingga waktu untuk mencapai puncaknya otomatis turun. Hal ini disebabkan karena jumlah uranium di dalam tera bertambah sehingga bertambah juga reaktivitas xenonnya ketika operasi daya tinggi.

Tabel 5. Konsentrasi Xe pada teras setimbang RSG-GAS

| Parameter | Unit | Oksida | Silisida | Silisida |
|--------------------|-----------|--------------|--------------|--------------|
| | | 2,96 gr U/cc | 2,96 gr U/cc | 3,55 gr U/cc |
| Xenon Setimbang | \$ | 4,058 | 4,059 | 4,656 |
| Puncak xenon | \$ jam | 12,791 | 12,824 | 13,028 |
| | | 9,82 | 9,82 | 9,68 |
| Peluruhan xenon | \$ | 0,755 | 0,757 | 0,757 |
| Waktu mati reaktor | jam | 20,07 | 20,14 | 20,27 |

Koefisien Reaktivitas

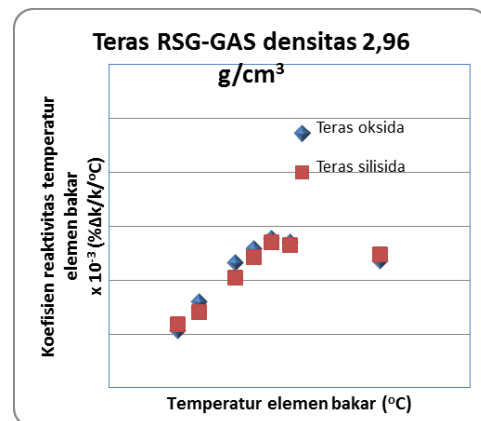
Jika pada bahan bakar terjadi kenaikan temperatur maka tampang lintang *resonance capture* puncak akan turun pada U-238 atau terjadi *resonance broadening* akan menyebabkan kehilangan neutron pada penyerapan energi

resonan pada U-238 akan naik sehingga mengakibatkan spektrum neutron akan berubah ke arah keras dan k_{eff} turun (energi resonan 7eV – 200 eV). Rasio $[\sigma_f/\sigma_a]_f$ akan berubah besarnya tergantung bahan bakarnya baru atau equilibrium. Untuk bahan bakar baru ra-

sionya turun sedangkan jika bahan bakar mempunyai fraksi bakar maka terdapat plutonium di dalam bahan bakar sehingga rasionya naik. Dengan kata lain, jika temperatur sistem naik energi neutron naik sehingga rasio tampang lintang turun sering disebut dengan peristiwa *Hot Neutron Effect*. Hal ini akan menyebabkan pada U-235 tampang lintang fisinya turun menghasilkan nilai k_{eff} turun tetapi nilai tampang lintang fisi untuk Pu-239 naik sehingga k_{eff} naik. Kombinasi keduanya akan menghasilkan lebih besar pengaruh yang pertama dari yang kedua sehingga menyebabkan reaktivitas turun dan koefisien reaktivitas bahan bakar negatif. Namun pada teras setimbang (*equilibrium core*) jika fraksi bakar terlalu besar dapat menyebabkan nilai koefisien reaktivitas bahan bakar justru positif. Koefisien reaktivitas bahan bakar bersifat *prompt* (< 1 detik) sehingga keselamatannya terhadap bahan bakar signifikan sering disebut dengan *inherent safety*.

Gambar 5. menunjukkan koefisien reaktivitas umpan balik sebagai fungsi temperatur untuk teras setimbang silisida RSG-GAS dengan densitas $2,96 \text{ gU/cm}^3$. Perubahan reaktivitas akibat temperatur bahan bakar memberikan pengaruh yang besar dibanding pengaruh kerapatan moderator dan temperatur bahan bakar dan sifatnya spontan (*prompt reactivity feedback*). Perubahan temperatur moderator, tanpa perubahan kerapatan, mengakibatkan bertambahnya serapan resonansi dan tangkapan-pembelahan (η). Bertambahnya serapan resonansi membuat nilai k_{eff} berkurang sedangkan tangkapan pembelahan membuat nilai k_{eff} bertambah. Penambahan ini lebih kecil dibanding

efek Doppler akibat naiknya temperatur bahan bakar. Secara total yang dapat dirasakan teras reaktor dengan bertambahnya temperatur akan menyebabkan turunnya nilai reaktivitas teras. Hal ini terlihat dengan nilai koefisien reaktivitas yang negatif. Perubahan reaktivitas akibat kerapatan moderator air, temperatur dipertahankan pada temperatur kamar, juga memberikan pengaruh yang lebih kecil dibanding pengaruh temperatur bahan bakar. Hal ini diakibatkan perubahan kerapatan air merubah konstanta kelompok difusi sehingga mengurangi kemampuan hamburan dan menambah tangkapan resonansi. Perubahan reaktivitas akibat kerapatan moderator air tidak linier mengakibatkan hubungan kerapatan dan temperatur moderator juga tidak linier.



Gambar 5. Koefisien reaktivitas bahan bakar

Jika perubahan reaktivitas pada Gambar 7 dirata-ratakan dalam rentang 20 hingga 100 °C, maka diperoleh koefisien reaktivitas umpan balik teras silisida RSG-GAS yang disajikan pada Tabel 6 yang menunjukkan koefisien reaktivitas umpan balik hasil perhitungan sebagai fungsi temperatur bahan bakar

dan moderator untuk teras setimbang silisida RSG-GAS dengan kerapatan uranium 2,96 gU/cm³. Perubahan reaktivitas akibat temperatur bahan bakar memberikan pengaruh yang lebih besar dibanding pengaruh temperatur moderator. Hal ini dapat dilihat dari nilai yang tertera dalam tabel tersebut. Hal ini diakibatkan bertambahnya serapan resonansi dan tangkapan-pembelahan (η). Penambahan ini jauh lebih kecil dibanding efek Doppler akibat naiknya temperatur bahan bakar. Dengan berubahnya suhu moderator, densitas moderator dan suhu

neutron akan berubah. Jika suhu moderator naik akan menurunkan tampang lintang absorpsi uranium sehingga menurunkan nilai faktor kerugian termal (*thermal disadvantage factor* = ϕ_m/ϕ_u) nilai harga k_{eff} naik maka nilai reaktivitas akan naik. Nilai yang diperoleh dari hasil perhitungan Batan-2DIFF untuk teras oksida sangat bersesuaian dengan hasil desain. Untuk itulah maka perhitungan dilanjutkan dengan teras silisida densitas yang sama.

Tabel 6. Koefisien reaktivitas teras silisida densitas 2,96 gU/cm³

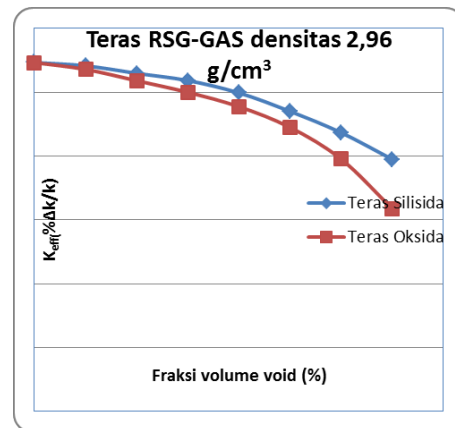
| Koefisien Reaktivitas | Kerapatan Uranium 2,96 gU/cm ³ | | |
|---|---|--|--------------------------|
| | Oksida | Silisida | Desain |
| Temperatur Bahan Bakar [%Dk/k/°C] | -1,61 x 10 ⁻³ | -1,65 x 10 ⁻³ | -1,60 x 10 ⁻³ |
| | -2,17 x 10 ⁻³ (eksperimen) | | |
| Temperatur Moderator [%Dk/k/°C] | -6,5 x 10 ⁻³ | -7,7 x 10 ⁻³ | -6,4 x 10 ⁻³ |
| | -6,1 x 10 ⁻³ (eksperimen) | -5,39 x 10 ⁻³ (eksperimen) | |
| Kerapatan moderator: | | | |
| Dalam satuan [%Dk/k/m ⁻³ kg] | -1,32 x 10 ⁻² | -1,41 x 10 ⁻² | - |
| Dalam satuan [%Dk/k/°C] | -6,60 x 10 ⁻³ | -6,72 x 10 ⁻³ | -5,7 x 10 ⁻³ |
| Void (%Dk/k /%void) | -1,38 x 10 ⁻¹ | -1,34 x 10 ⁻¹ -1,36 x 10 ⁻¹ | -1,2 x 10 ⁻¹ |

Hasil yang diperoleh tidak jauh berbeda yaitu sedikit lebih kecil teras silisida. Hal ini disebabkan oleh karena tampang lintang serapan silisida jauh lebih besar dari oksida sehingga akan menurunkan efek reaktivitas dengan adanya kenaikan temperatur. Namun jika dibandingkan dengan hasil eksperimen teras oksida terjadi perbedaan yang mencolok yang disebabkan oleh karena temperatur yang digunakan pada saat eksperimen tidak sama dengan nilai saat perhitungan dan pada saat eksperimen tidak dapat dibatasi hanya perubahan temperatur saja na-

mun juga dipengaruhi oleh ekspansi termal material. Nilai koefisien untuk kedua teras yaitu oksida dan silisida dengan densitas bahan bakar yang sama yaitu 2,96 gU/cm³ tidak jauh berbeda namun nilainya tidak linier sehingga besarnya nilai koefisien reaktivitas ini dipengaruhi oleh temperatur material sekelilingnya.

Untuk perhitungan void teras oksida densitas 2,96 gU/cm³ juga menghasilkan nilai yang negatif dan nilainya sesuai dengan hasil desain. Jika teras RSG-GAS mempunyai koe-

fisien reaktivitas void yang negatif akan lebih baik dibanding koefisien reaktivitas void yang positif karena kalau negatif maka dengan adanya void di teras reaktor maka menjadikan umpan balik negatif sehingga jika terjadi void maka daya akan turun dan berlaku sebaliknya. Sesungguhnya fraksi void tidak akan terjadi di dalam teras reaktor riset seperti RSG-GAS namun karena moderator atau pendinginnya air hal ini memungkinkan untuk mendidih dan terjadi void apabila terjadi gangguan. Jika dibandingkan koefisien reaktivitas void teras oksida dan silisida tidak jauh berbeda bahkan dengan perhitungan SRAC juga tidak jauh berbeda. Namun jika dibandingkan dengan desain terjadi perbedaan sekitar 15 %. Dalam desain reaktor riset diinginkan koefisien reaktivitas void besar karena baik untuk stabilitas dan keselamatan operasi reaktor namun jika terlalu besar maka dibutuhkan sistem kontrol yang pergerakannya sangat cepat. Koefisien reaktivitas void sebagai fungsi volume void dapat dilihat pada Gambar 6. Nilai koefisien reaktivitas void untuk kedua teras antara oksida dan silisida dengan densitas yang sama $2,96 \text{ gU/cm}^3$ tidak jauh berbeda. Semakin besar volume void koefisiennya menuju nol atau tidak ada umpan balik melalui void.



Gambar 6. Koefisien reaktivitas void

Nilai koefisien temperatur bahan bakar (KRTF) teras silisida $3,55 \text{ gU/cm}^3$ lebih besar jika dibanding dengan teras silisida RSG-GAS dengan kerapatan uranium $2,96 \text{ gU/cm}^3$ seperti pada Tabel 6. Sedangkan untuk koefisien reaktivitas temperatur moderator (KRTM) silisida $3,55 \text{ gU/cm}^3$ lebih kecil dibanding dengan silisida $2,96 \text{ gU/cm}^3$. Kenyataan ini menunjukkan bahwa pada bahan bakar RSG-GAS, pengaruh umpan balik reaktivitas moderator lebih lemah, sensitifitas interaksi moderator dan bahan bakar yang tinggi, dibanding bahan bakar itu sendiri.

Nilai koefisien reaktivitas void (KRV) untuk silisida 2,96 gU/cm³ adalah $1,34 \times 10^{-1}$ % $\Delta k/k/\%$ void, jika dibandingkan dengan nilai KRV teras silisida 3,55 gU/cm³ maka terjadi penurunan nilai sebesar 1,5 %. Pada Tabel 7 nilai KRDM (koefisien reaktivitas densitas moderator) teras silisida 3,55 gU/cm³ jika dibandingkan dengan silisida 2,96 gU/cm³ pada Tabel 6 memiliki perbedaan sebesar 7% dan 10% masing-masing untuk satuan %Dk/k/kgm⁻³ dan %Dk/k/⁰C. Perbedaan ini tidak signifikan

jika dibanding dengan perbedaan pada KRTM. Kenyataan ini menunjukkan pengaruh yang terbesar adalah pada tampang lintang tangkapan neutron moderator air sebagai fungsi temperatur.

Tabel 8 menunjukkan bahwa parameter termohidrolika teras oksida dan silisida berbeda terutama suhu bahan bakarnya. Untuk teras oksida suhu bahan bakarnya pada kanal panas 157 °C sedangkan silisida 149 °C. Hal ini menandakan bahwa daya hantar panas ba-

Tabel 7. Koefisien reaktivitas teras silisida 3,55 gU/cm³

| Koefisien Reaktivitas | Rentang | Nilai |
|------------------------|---|--|
| Temperatur Bahan Bakar | 20 °C - 100 °C | $-1,20 \times 10^{-3} \% \Delta k/k/^\circ C$ |
| Temperatur Moderator | 20 °C - 65 °C | $-3,30 \times 10^{-3} \% \Delta k/k/^\circ C$ |
| Kerapatan moderator | 958 kg/m ³ – 998 kg/m ³ | $-1,01 \times 10^{-2} \% \Delta k/k/^\circ C$ |
| | 20 °C - 100 °C | $2,3 \times 10^{-3} \% \Delta k/k/kgm^{-3}$ |
| Void | 0 - 20 % | $-1,36 \times 10^{-1}$ $-1,42 \times 10^{-1}$ |

Tabel 8. Parameter termohidraulik teras silisida dan oksida densitas 2,96 gU/cc

| PARAMETER | Oksida 2,96 gU/cc | | Silisida 2,96 gU/cc | |
|---|-------------------|-------------|---------------------|-------------|
| | Kanal Rerata | Kanal Panas | Kanal Rerata | Kanal Panas |
| Suhu Pendingin masuk kanal, °C | 44,5 | 44,5 | 44,5 | 44,5 |
| Suhu Pendingin keluar kanal, °C | 92,73 | 92,73 | 63,19 | 96,69 |
| Suhu Kelongsong, °C | 93,57 | 148,70 | 93,40 | 144,06 |
| Suhu Bahan Bakar, °C | 96,96 | 157,58 | 95,54 | 149,39 |
| Koefisien Perpindahan panas, W/cm ² C | 1,9673 | 2,3880 | 1,9991 | 3,1294 |
| Fluks panas, W/cm ² | 75,687 | 247,950 | 73,543 | 211,628 |
| Kecepatan pendingin, cm/det. | 324,70 | 324,70 | 324,90 | 324,90 |
| Tekanan Pendingin masuk kanal, kg/cm ² | 1,997 | 1,997 | 1,997 | 1,997 |
| Hilang tekan total sepanjang EB, kg/cm ² | 0,3794 | 0,3780 | 0,3794 | 0,3794 |
| Tekanan Pendingin keluar kanal, kg/cm ² | 1,667 | 1,699 | 1,667 | 1,697 |
| Suhu Jenuh pendingin, °C | - | 118,46 | - | 118,46 |
| Suhu Awal Pendidihan inti, °C | - | 130,41 | - | 130,05 |
| η | - | 56,1 | - | 60,4 |
| Marjin instabilitas aliran | - | 2,54 | - | 2,73 |

han bakar oksida lebih buruk dibandingkan silisida dan ini disebabkan sifat logam silisida yang dapat menghantar panas dengan baik. Sehingga bahan dari aspek termohidrolika bahan bakar silisida jauh lebih baik dibanding silisida.

KESIMPULAN

Hasil analisis menunjukkan bahwa penggunaan material bahan bakar yang berbeda dengan densitas yang sama tidak mempengaruhi efek pada parameter kinetik dan koefisien umpan balik reaktivitas pada teras RSG-GAS. Adanya perbedaan sedikit dan tidak signifikan adalah masih dalam batas ketidak-tentuan dari pustaka tampang lintang. Perbedaan signifikan terjadi hanya pada reaktivitas lebih teras saat dimana teras menggunakan bahan bakar oksida lebih besar dibanding silisida dengan densitas yang sama. Bahan bakar oksida mempunyai konduktivitas termal yang buruk sehingga umpan balik Doppler lebih besar yang menyebabkan analisis transien reaktivitas lebih besar dibanding bahan bakar lainnya. Apabila konduktivitas termal semakin buruk akan menyebabkan naiknya temperature bahan bakar dan tekanan termal (*thermal stresses*) yang akan menyebabkan terjadi *swelling* dan *cracking* bahan bakar. Sehingga dapat disimpulkan bahwa sangat perlu untuk menggantikan bahan bakar yang konduktivitas termalnya jelek seperti oksida ke konduktivitas seperti silisida atau kalau masih menggunakan bahan bakar tersebut gunakan daya reaktor serendah mungkin. Penggunaan bahan bakar

silisida dan molybdenum juga tidak merubah parameter neutronik dan kinetik yang signifikan pada densitas yang sama yaitu 3,55 gU/cc, sehingga penggantian bahan bakar densitas sama akan tidak merubah *inherent safety features* dari teras reaktor RSG-GAS.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan terima kasih kepada Peneliti di BATAN yang telah membantu memberikan saran dan diskusinya sehingga membuat makalah ini semakin baik dan juga KPTP PRSG yang telah mengoreksi makalah ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. FARHAN M and ASAD MAJID, "Kinetic Parameters of a Material test Research Reactor Fueled with high Density U3Si2 Dispersion Fuels", *Annals of Nuclear Energy* 51, 2009.
2. TUKIRAN S, "Analisis Kecelakaan Reaktivitas Teras RSG-GAS Berbahan Bakar Silisida", *Prosiding Seminar Ke-7, Teknologi dan Keselamatan PLTN Serta Fasilitas Nuklir, ISSN: 0854-2910, Bandung, 19 Februari 2002.*
3. TUKIRAN S dan T.M. SEMBIRING, "Analisis Neutronik Teras RSG-GAS Berbahan Bakar Silisida", *Prosiding Kontribusi Fisika Indonesia, ISSN: 0854-6878, HFI, FMIPA-Fisika, ITB-Bandung, Vol. 12, No. 3, 1998.*

4. TUKIRAN S,” Koefisien Reaktivitas dan Reaktivitas Xenon Teras RSG-GAS”, Bahan Mengajar pada Diklat Selingkung Manajemen Teras RSG-GAS di Pusbang Teknologi Reaktor Riset, Serpong, 2000
5. LILY S, “Kajian Desain Konfigurasi Teras Reaktor Riset Untuk Persiapan Rancangan Reaktor Riset Baru di Indobesia”, Prosiding Seminar PPI-PDIPDT PTAPB-Yogyakarta, 2011.
6. FARHAN M and ASAD MAJID, “Effects of High Desity Dispersion Loading on the Kinetic Parameters of a Low Enrichment Uranium Fueled Material Test Reserch Reactor”. *Annals of Nuclear Energy* 35, 2008.
7. ZAHER M, “Effective Delayed Neutron Fraction and Prompt Neutron Lifetime of Teheran Research Reactor”, *Annals of Nuclear Energy* 30, 2003.
8. TUKIRAN S dan IMAN KUNTORO, “Peningkatan Batas Maksimum Fraksi Bakar Buang Bahan Bakar Silisida Reaktor RSG-GAS”, Prosiding Presentasi Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir VI, ISSN:1410-1998, Jakarta 7-8 Nopember 2001.
9. TUKIRAN S, “Analisis Pengaruh Densitas Pada Koefisien Reaktivitas Temperatur Bahan Bakar”, Prosiding PPI-PDIPTN, PTAPB-Batan Yogyakarta 10 Juli 2006.
10. T.M. SEMBIRING dan S. PINEM “Evaluasi Koefisien Reaktivitas Temperatur Moderator Reaktor Daya PWR 1000 MWe”, Prosiding Seminar Ke -17, Teknologi dan Keselamatan PLTN Serta Fasilitas Nuklir, ISSN: 0854-2910, Yogyakarta, 01 Oktober 2011.