

## PENILAIAN KESELAMATAN PENGGUNAAN ELEMEN BAKAR $U_3Si_2$ di RSG-GAS.

Endang Susilowati  
Pusat Reaktor Serba Guna - Badan Tenaga Atom Nasional

### ABSTRAK

**PENILAIAN KESELAMATAN PENGGUNAAN ELEMEN BAKAR  $U_3Si_2$  di RSG- GAS.** Elemen bakar memberikan kontribusi yang sangat besar terhadap keselamatan operasi reaktor. Elemen bakar  $U_3Si_2$ -Al mempunyai beberapa keunggulan dibanding elemen bakar  $U_3O_8$ - Al, yang sampai saat ini digunakan untuk operasi teras reaktor. Karakteristik ini ditunjukkan oleh densitas  $U_3Si_2$  sebesar  $12,2 \text{ g/cm}^3$  dan konduktivitas  $U_3Si_2$  sebesar  $1,07 \text{ W/cm}^\circ\text{K}$ . Harga densitas dan konduktivitas elemen bakar  $U_3O_8$  masing-masing sebesar  $8,4 \text{ g/cm}^3$  dan  $0,13 \text{ W/cm}^\circ\text{K}$ . Dengan mengasumsikan bahwa spesifikasi  $U_3Si_2$ -Al sama dengan  $U_3O_8$ - Al, telah dianalisis ketahanan elemen bakar  $U_3Si_2$  bila digunakan untuk operasi teras RSG-GAS sampai tingkatan fraksi bakar (burn- up) 56%. Hasil pengkajian menunjukkan bahwa pada kondisi tersebut elemen bakar mengalami pembengkakan (swelling) sebesar  $0,011 \text{ mm}$ . Harga ini sesuai dengan harga foil (fission density) sebesar  $2,86 \cdot 10^2 \text{ fisi/m}^3$ . Dan stress yang diderita kelongsong sebesar  $10,09 \text{ N/mm}^2$ . Dapat disimpulkan bahwa penggunaan elemen bakar  $U_3Si_2$  dapat dipertanggung jawabkan keselamatannya.

### ABSTRACT

**SAFETY ASSESSMENT OF UTILIZING THE  $U_3Si_2$  FUEL ELEMENT IN G. A. SIWABESSY MULTIPURPOSE REACTOR.** Fuel elements have strong contribution to the safety of reactor operation. The  $U_3Si_2$  fuel elements have more advantages than  $U_3O_8$  fuel elements currently being used in G. A. Siwabessy Multipurpose Reactor. Those characteristics are demonstrated in both its density  $12.2 \text{ g/cm}^3$  and its conductivity  $1.07 \text{ W/cm}^\circ\text{K}$ . The density and the conductivity of the  $U_3O_8$  are  $8.4 \text{ g/cm}^3$  and  $0.13 \text{ W/cm}^\circ\text{K}$  respectively. Assuming that the  $U_3Si_2$ -Al specification similar to that of the  $U_3O_8$ -Al, assessment regarding endurance of the  $U_3Si_2$  up to 56% burn-up level has been carried out. From the assessment it is obtained that on this condition, the fuel element will suffer swelling of  $0.011 \text{ mm}$ . The value is similar to fission density  $2.86 \cdot 10^2 \text{ fission/m}^3$ . Stress on the cladding is  $10.09 \text{ N/mm}^2$ . It can be concluded that utilization of the  $U_3Si_2$  fuel elements in G. A. Siwabessy Multipurpose Reactor is warranted its safety.

### PENDAHULUAN

Sejak awal operasinya, RSG-GAS menggunakan bahan bakar *Low Enriched Uranium* (LEU) dalam bentuk  $U_3O_8$  yang terdispersi di dalam matrik Al dan terbungkus kelongsong AlMg<sub>2</sub>. Kandungan uranium di dalam  $1 \text{ cm}^3$  *meat* sebesar 2,96 g. Selama operasi reaktor, U-235 yang terkandung di dalam matrik Al akan mengalami pembelahan dan menghasilkan produk fisi serta membebaskan panas. Setiap terjadi pembelahan, volume elemen bakar akan bertambah sehingga produk fisi harus dibatasi karena dapat menyebabkan pembengkakan (swelling). Produk fisi yang sebagian besar berbentuk gas akan menekan matrik Al dan kelongsong. Untuk mempertahankan agar produk fisi tidak keluar ke pendingin, matrik Al dan kelongsong harus cukup kuat.

Elemen bakar  $U_3Si_2$ -Al mempunyai beberapa keunggulan dibanding elemen bakar  $U_3O_8$ -Al. Hal ini ditunjukkan pada densitas  $U_3Si_2$  yang lebih besar dari densitas  $U_3O_8$ . Pada konsentrasi uranium/cm<sup>3</sup> *meat* yang sama, elemen bakar  $U_3Si_2$  akan membentuk kungkungan matrik Al yang lebih kuat dibanding elemen bakar  $U_3O_8$ . Dari segi keselamatan operasi, hal ini sangat menguntungkan karena produk fisi semakin sulit untuk keluar. Keunggulan yang lain adalah konduktivitas  $U_3Si_2$  lebih besar dari konduktivitas  $U_3O_8$ . Aspek ini sangat terkait dengan termohidrolisa teras.

Mengacu pada karakteristik  $U_3Si_2$  tersebut di atas, penggunaan elemen bakar  $U_3Si_2$ -Al di RSG-GAS perlu dikaji lebih dalam, agar dapat diwujudkan penggunaannya.

Lingkup dari makalah ini dibatasi pada pengkajian ketahanan elemen bakar  $U_3Si_2$  yang terkait dengan keselamatan operasi reaktor.

## TEORI

Elemen bakar mempunyai kemampuan untuk menimbulkan bahaya radiasi. Hal ini ditunjukkan dengan adanya timbunan produk fisi yang terkungkung di dalam matrik. Sehingga untuk mempertahankan keselamatan operasi reaktor, matrik dan kelongsong harus cukup kuat dan mampu mempertahankan keutuhan elemen bakar tersebut selama masa tinggalnya di dalam reaktor.

Elemen bakar  $U_3Si_2$ -Al dengan densitas  $U_3Si_2$  sebesar  $12,2 \text{ g/cm}^3$  mampu membentuk kungkungan matrik yang lebih kuat dari pada yang dilakukan oleh elemen bakar  $U_3O_8$ -Al dengan densitas  $8,4 \text{ g/cm}^3$  [1]. Bertitik tolak pada perbedaan densitas ini, fraksi volume *fuel* di dalam *meat*  $U_3Si_2$ -Al lebih kecil dari pada di dalam *meat*  $U_3O_8$ -Al. Akibatnya, produk fisi yang terbentuk selama proses pembelahan tertahan di dalam struktur kristal matrik yang tebal dan semakin sulit untuk lolos. Produk fisi yang berupa gas akan mengisi ruang hampa (void) yang berada di dalam *meat*.

Apabila ruang hampa sudah tidak mampu menampung gas hasil fisi yang terbentuk, gas tersebut akan menekan kelongsong dan akhirnya elemen bakar menderita pembengkakan. Pembengkakan merupakan fungsi dari rapat fisi atau fraksi bakar (burn-up). Batasan rapat fisi yang diizinkan untuk elemen bakar LEU  $U_3Si_2$  adalah sebesar  $15,7 \times 10^{27}$  fisi/ $m^3$ .

Ditinjau dari aspek termohidrolika, penggunaan elemen bakar  $U_3Si_2$  mengakibatkan suhu di dalam *meat* lebih rendah dibandingkan penggunaan elemen bakar  $U_3O_8$ . Hal ini dijelaskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$t = x \cdot q'' / k \quad [2] \quad (1)$$

$t$  = penurunan suhu di dalam *meat* elemen bakar

$q''$  = fluks panas maksimum yang dibangkitkan di teras

$x$  = tebal *meat* elemen bakar

$k$  = konduktivitas *meat* elemen bakar

Konduktivitas  $U_3Si_2$  yang lebih besar dari konduktivitas  $U_3O_8$  menyebabkan suhu di dalam *meat*  $U_3Si_2$ -Al lebih rendah dari pada suhu di dalam *meat*  $U_3O_8$ -Al. Dalam kondisi ini, tegangan termal  $U_3Si_2$  lebih rendah dibanding tegangan termal  $U_3O_8$ . Akibat lebih lanjut

adalah deformasi pada plat elemen bakar  $U_3Si_2$ -Al lebih kecil dibanding plat  $U_3O_8$ -Al.

Masalah lain yang perlu dikaji untuk mempertahankan keutuhan elemen bakar adalah beban yang diderita oleh kelongsong elemen bakar. Salah satu parameter penyebab kegagalan kelongsong adalah : Kelongsong retak sehingga gas hasil fisi yang tertahan di dalam matrik keluar ke pendingin. Kegagalan ini disebabkan kelongsong tidak mampu menahan beban yang berasal dari dalam dan luar. Tekanan luar kelongsong disebabkan dari tekanan pendingin reaktor, sedangkan tekanan dalam berasal dari :

- tekanan gas hasil fisi
- tekanan karena termal stress

## PERHITUNGAN

### Analisis pembengkakan

Dasar perhitungan :

- rapat uranium di dalam *meat*  $U_3Si_2 = 2,96 \text{ g}$
- pengayaan  $= 19,75 \%$
- $\rho U_3Si_2 = 12,2 \text{ g/cm}^3$
- tingkat fraksi bakar  $= 56 \%$

a. Rapat pembelahan U-235 di dalam *meat*,  $F_M$  diperoleh dengan korelasi :

$$F_M = \frac{\rho_{um} \cdot e \cdot N \cdot B}{x_b \cdot A (1 + \alpha)}$$

$\rho_{um}$  = rapat uranium di dalam *meat*

$e$  = pengayaan

$N$  = bilangan Avogadro =  $6,022 \times 10^{23}$

$B$  = tingkat fraksi bakar

$x_b$  = fraksi U-235 yang berfisi

$A$  = berat molekul U-235

$\alpha$  = perbandingan antara tangkapan pembelahan neutron = 0,19

Dari Grafik 1 yang menggambarkan, korelasi antara tingkat fraksi bakar terhadap fraksi U-235 yang membelah, diperoleh  $X_b = 0,94$ .

Dengan menggunakan rumus di atas didapat.

$$F_M = 0,75 \times 10^{21} \text{ fisi/cm}^3$$

b. Fraksi volume di dalam *meat*,  $V_f$

$$\rho_u \text{ di dalam } U_3Si_2 = \frac{BA U}{BM U_3Si_2} \cdot \rho U_3Si_2$$

$\rho_u$  = densitas uranium

$BA U$  = berat atom uranium

$BM$  = berat molekul

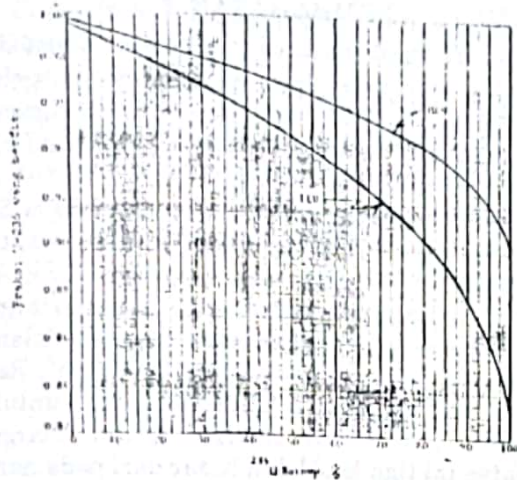
$\rho U_3Si_2$  = densitas  $U_3Si_2 = 12,2 \text{ g/cm}^3$

Sehingga diperoleh  $\rho_u$  di dalam  $U_3Si_2 = 11,31 \text{ g/cm}^3$ .

Fraksi volume *fuel* di dalam *meat*,  $V_F$   

$$V_F = \frac{\text{rapat uranium di dalam meat}}{\rho_u \text{ di dalam } U_3Si_2}$$

$$= 0,262.$$



Gambar 1. Tingkat fraksi bakar terhadap fraksi U-235 yang berfisi.

c. Fraksi volume void,  $V_p$

Berdasarkan data pengukuran yang didapat dari ANL [2] fraksi void  $U_3Si_2$ , diperoleh dari korelasi:

$$V_p = 0,072 V_F - 0,275 V_{F2} + 1,32 V_{F3}$$

$V_p$  = fraksi volume void

$V_F$  = fraksi volume *fuel* = 0,262

Dengan menggunakan korelasi di atas diperoleh harga  $V_p = 0,024$ .

d. Rapat pembelahan U-235 di dalam *fuel*,  $F_F$

$$F_F = F_M / V_F$$

$$= \frac{0,75 \times 10^{21}}{0,262} = 2,86 \times 10^{21} \text{ fisi/cm}^3$$

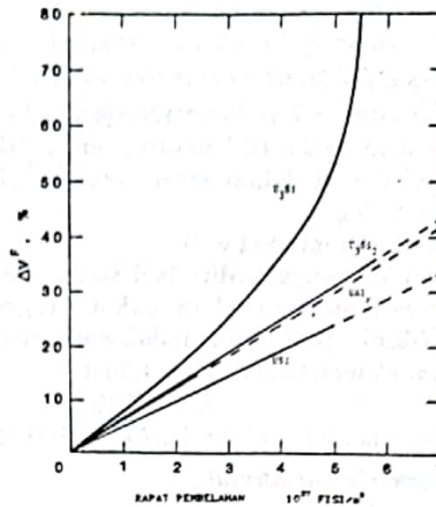
e. Prosentasi perubahan volume *fuel*.

Dari Gambar 2, yang menyatakan hubungan pembengkakan dari  $U_3Si_2$  terhadap rapat pembelahan, dapat dibaca bahwa pada  $F_F = 2,86 \times 10^{21}$  diperoleh harga  $V_F = 17\%$

Pertambahan volume di dalam  $1 \text{ cm}^3$  *meat*,  
 $V_F = (0,17)(V_F)$   
 $= (0,17)(0,262)$   
 $= 0,045 \text{ cm}^3/\text{cm}^3 \text{ meat}$

Pertambahan volume *meat*  $\Delta V_M = V_F - V_p$   
 $= 0,045 - 0,024$   
 $= 0,021 \text{ cm}^3/\text{cm}^3 \text{ meat}$

Biasanya, pembengkakan terjadi pada arah horisontal, sehingga *meat* mengalami pertambahan tebal,  $\Delta t_m = (\text{tebal meat})(\Delta V_M)$   
 $= 0,011 \text{ mm}.$



Gambar 2. Hubungan antara pembengkakan terhadap rapat pembelahan.

Perhitungan suhu *meat* elemen bakar

Karena muatan U-235 di dalam *meat* tidak berubah, maka rapat daya dan faktor daya puncak tetap. Mengacu pada dokumen SAR RSG-GAS revisi 7, suhu *meat* elemen bakar  $U_3O_8$  pada daya nominal adalah  $200^\circ\text{C}$ . Sedangkan suhu *meat* pada daya lebih adalah  $207^\circ\text{C}$ .

Pada kondisi daya nominal, teras reaktor terdiri dari 960 plat elemen bakar.

$$\text{Total volume meat} = p_m \times l_m \times t_m \times 960$$

$$= 19518 \text{ cm}^3$$

Rapat daya rata-rata = daya nominal teras/volume *meat*

$$= 1537 \text{ W/cm}^3$$

Luas perpindahan panas/cm<sup>3</sup> *meat*

$$= 2 \times \text{luas penampang plat/volume meat}$$

$$= 37,04 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$$

Fluks panas rata-rata =  $1537/37,04$

$$= 41,50 \text{ W/cm}^2$$

Fluks panas maksimum = (fluks panas rata-rata) (faktor puncak daya)

$$= 221,7 \text{ W/cm}^2$$

Penurunan suhu di dalam *meat* elemen bakar:

Penurunan suhu di dalam *meat*  $U_3O_8$ -Al,  $\Delta t_m$

$$\Delta t_m U_3O_8 = (1/2 t_m)(\text{fluks panas maksimum})/k U_3O_8\text{-Al} = 46,0^\circ\text{C}.$$

Penurunan suhu di dalam *meat*  $U_3Si_2$ -Al,  $\Delta t_m$

$$\Delta t_m U_3Si_2 = (1/2 t_m)(\text{fluks panas maksimum})/k U_3Si_2\text{-Al} = 5,6^\circ\text{C}.$$

Perbedaan  $\Delta t_m U_3O_8$  dan  $\Delta t_m U_3Si_2 = 40,4^\circ\text{C}.$

Maka, dengan menggunakan elemen bakar  $U_3Si_2-Al$ , suhu *meat* maksimum = 207-40,4  
= 166,6 °C.

#### Analisis tekanan

##### Dasar perhitungan

- fraksi bakar = 56%
- waktu iradiasi = 7 siklus = 4200 jam
- fluks neutron =  $2 \times 10^{14}$  neutron/cm<sup>2</sup> detik
- berat U-235 di dalam *meat* elemen bakar segar = 250 g
- jumlah plat/perangkat = 21
- gas hasil fisi hanya terdiri dari Xe dan Kr

Dengan menggunakan paket program ORIGEN-2, didapat bahwa jumlah gas hasil fisi/perangkat elemen bakar : Kr = 1,56 g  
Xe = 17,49 g

Jumlah gas hasil fisi/plat = 0,97 g = 0,007 grat

##### Perhitungan tekanan internal :

$$p_i = n RT/V$$

- $p_i$  = tekanan internal
- $n$  = berat gas hasil fisi = 0,007 gmol
- $R$  = konstanta gas = 0,082 l atm/gmol °K
- $T$  = suhu *meat* = 166 °C
- $V$  = volume gas hasil fisi
- Volume *meat* =  $p_m \times l_m \times t_m$   
= (60,0) (6,275) (0,054)  
= 20,33 cm<sup>3</sup>

Pertambahan volume di dalam 1 plat elemen bakar

$$= V_M \times \text{volume meat} = 0,42 \text{ cm}^3$$

Volume gas hasil fisi yang menekan kelongsong = 0,42 cm<sup>3</sup>

Dengan korelasi di atas, didapat  $p_i = 1,008$  atm. Besarnya tekanan dalam yang ditimbulkan oleh produk fisi

$$p_i = 1,008 \text{ atm} = 10,08 \text{ N/mm}^2$$

Tekanan pendinginan reaktor,

$$p_o = 1,997 \text{ atm} = 19,97 \text{ N/mm}^2$$

Tekanan yang diderita kelongsong

$$= p_o - p_i = 9,89 \text{ N/mm}^2$$

#### Analisis termal stress

Rapat daya rata-rata = 1537 W/cm<sup>3</sup>

Termal stress =  $E \cdot \alpha \cdot k \cdot H \cdot a^2/12 (1 - \mu) k$  [4]

$E$  = modulus elastisitas kelongsong  
= 66,000 N/mm<sup>2</sup>

$\alpha k$  = koefisien ekspansi panas kelongsong  
=  $23,4 \times 10^{-6}/^\circ K$

$H$  = panas yang dibangkitkan dalam 1 cm<sup>3</sup> plat elemen bakar

$m$  = Poisson ratio = 0,35

$k$  = konduktivitas kelongsong = 2,16 W/cm K  
 $a$  = tebal kelongsong = 0,38 mm

Dengan menggunakan korelasi di atas, termal stress = 0,2 N/mm<sup>2</sup>.

#### HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari hasil perhitungan di atas dapat diperoleh data dan dianalisis karakteristik elemen bakar  $U_3Si_2-Al$  dan sifat-sifat kelongsong yang berkaitan dengan keselamatan operasi reaktor.

1. Pada tingkatan fraksi bakar 56%, daya 30 MW, fluks neutron  $2,24 \times 10^{14}$  n/cm dt, waktu iradiasi 4200 jam, elemen bakar  $U_3Si_2-Al$  menderita pembengkakan 0,011 mm. Harga ini sebanding dengan harga rapat fisi dalam elemen bakar sebesar  $2,86 \cdot 10^{27}$  fisi/m<sup>3</sup>. Rapat fisi maksimum yang diizinkan untuk LEU  $U_3Si_2$  adalah  $15,7 \cdot 10^{27}$  fisi/m<sup>3</sup>. Harga batas ini tiga kali lebih besar dari pada harga yang diizinkan untuk LEU  $U_3O_8$ . [2]
2. Gas hasil fisi yang timbul pada kondisi seperti pada no. 1 di atas adalah sebesar 0,97 g/plat. Gas ini memberikan tekanan sebesar 10,08 N/mm<sup>2</sup>. Setelah diperhitungkan dengan tekanan dari pendingin reaktor, dapat diketahui tekanan yang diderita kelongsong yaitu sebesar 9,89 N/mm<sup>2</sup>.
3. Suhu maksimum di dalam *meat* elemen bakar  $U_3Si_2-Al$  sebesar 166,6 °C. Harga ini 40° lebih rendah dari pada suhu pada elemen bakar  $U_3Si_2-Al$  yaitu sebesar 207 °C. Akibatnya termal stress yang diderita elemen bakar  $U_3Si_2$  lebih rendah dari pada yang diderita  $U_3O_8-Al$ . Stress karena panas yang diderita kelongsong sebesar 0,2 N/mm<sup>2</sup>. Harga ini bila ditambahkan dengan stress karena tekanan akan didapatkan stress total yang diderita kelongsong, yaitu sebesar 10,09 N/mm<sup>2</sup>. Yield strength material AlMg<sub>2</sub> adalah 29 N/mm<sup>2</sup>. Dengan kondisi ini, kelongsong masih berada pada daerah elastis (aman).

#### KESIMPULAN

Dari hasil pengkajian karakteristik elemen bakar  $U_3Si_2-Al$  yang meliputi ketahanan matrik dalam mengungkung produk fisi dan ketahanannya terhadap termal stress, dapat disimpulkan bahwa penggunaan elemen bakar  $U_3Si_2$  di RSG-GAS lebih andal dari pada menggunakan elemen bakar  $U_3O_8$ .

## DAFTAR PUSTAKA

- DAFTAR PUSTAKA1. Copeland, G. L., Performance of Low Enriched  $U_3Si_2$ -Al Dispersion Fuel Elements in The Oak Ridge Research Reactor.
2. Snellgrove, J. L., Domagala, R. F., The Use of  $U_3Si_2$  Dispersed in Plate Type Fuel Elements Research and Test Reactors, Argon National Laboratory, Argonne, Illinois (1972).
3. ORNL - 2127 Part 1, Volume 2, Oak Ridge National Laboratory (1957).
4. Reactor Manufacturing Interface, Bahan Training, MPI (1985).
5. Savety Analysis Report, RSG-GAS, Revisi 7 (1989).