

ASPEK KESELAMATAN PENGUNAAN BAHAN BAKAR U_3Si_2 MUATAN LEBIH DI RSG-GAS

Endang Susilowati

ABSTRAK

ASPEK KESELAMATAN PENGUNAAN BAHAN BAKAR U_3Si_2 MUATAN LEBIH DI RSG-GAS. Bahan bakar silisida dengan bentuk senyawa U_3Si_2-Al yang saat ini digunakan untuk operasi reaktor serba guna GA Siwabessy (RSG-GAS) mempunyai muatan uranium 2,96 gram/cm³ pelat. Muatan tersebut masih dapat dinaikkan karena U_3Si_2 mempunyai densitas yang tinggi yaitu 12,2 gram/cm³. Saat ini bahan bakar U_3Si_2-Al muatan 4,8 gram/cm³ pelat sedang dikembangkan dengan tujuan untuk mengoptimalkan penggunaannya di dalam operasi teras reaktor. Tulisan ini membahas aspek keselamatan dalam kaitannya dengan integritas U_3Si_2-Al muatan 4,8 gram selama penggunaannya untuk operasi RSG-GAS. Perhitungan dilakukan dengan asumsi bahwa desain pendingin reaktor tidak berubah, reaktor dioperasikan pada daya 30 MW dan bahan bakar digunakan sampai mencapai fraksi bakar 72 %. Dari hasil analisis diperoleh bahwa pada kondisi tersebut bahan bakar U_3Si_2-Al mengalami pembelahan sebesar $2,939 \times 10^{21}$ fisi/cm³. Batas pembelahan yang diijinkan adalah $15,7 \times 10^{21}$ fisi/cm³. Efek lain dari kenaikan muatan adalah bahwa konduktivitas U_3Si_2 turun dari 1,07 W/cm²K menjadi 0,28 W/cm²K. Penurunan konduktivitas ini menaikkan temperatur *meat* bahan bakar sebesar 11,1°C. Temperatur *meat* bahan bakar dengan muatan uranium 2,96 gram adalah 144,98°C. Dengan kenaikan temperatur sebesar 11,1°C, temperatur *meat* bahan bakar menjadi 156,08°C. Batas maksimum temperatur *meat* bahan bakar adalah 200°C. Dapat disimpulkan bahwa penggunaan elemen bakar U_3Si_2-Al muatan 4,8 gram/cm³ dan dibakar sampai 72% masih tetap aman.

ABSTRACT

SAFETY ASPECT OF UTILIZATION OF THE U_3Si_2 EXTENDED LOADING FUEL ELEMENT AT THE RSG-GAS. The U_3Si_2 silicide fuel element currently used for multi purpose reactor GA Siwabessy (RSG-GAS) operation having uranium load of 2,96 gram/cm³ fuel element plate. The magnitude of uranium loading in the fuel plate can be increased due to its higher density of 12,2 gram/cm³ plate. For the time being the U_3Si_2-Al fuel element by 4.8 gram uranium loading are being developed in order to optimize its uses for the GA Siwabessy reactor operation. This paper assesses the safety aspects in connection to the integrity of the U_3Si_2-Al fuel element during its use for reactor operation. Calculation was done by assuming that the reactor is operated at 30 MW, the cooling system is not modified and the silicide fuel is burned till to 72%. Result of the assessment show that on that condition, fission density of the U_3Si_2 fuel element is within 2.939×10^{21} fission/cm³. Safety limit of fission density is $15,7 \times 10^{21}$ fission/cm³. Another effect of extended loading of uranium in the fuel plate causing decrease of its conductivity from 1.07 W/cm² K to 0,28 W/cm² K. Eventually temperature at the fuel meat increase to 11.1°C. Fuel meat temperature of 2.96 gram uranium loading is 144,98°C and fuel meat temperature of 4.8 gram uranium loading is 156.08°C. Safety margin stated in Safety Analysis report is 200°C. Then it can be concluded that utilization of the U_3Si_2-Al fuel element by 4.8 gram uranium loading and burn-up of 72% at the RSG-GAS is safely assured

PENDAHULUAN

Saat ini operasi reaktor GA Siwabessy (RSG-GAS) menggunakan bahan bakar *Low Enriched Uranium* (LEU) jenis U_3Si_2 yang terdispersi di dalam matrik Al dan terbungkus kelongsong AlMg₂. Muatan uranium dalam 1 cm³ pelat adalah sebesar 2,96 gram.¹⁾ Sebelum menggunakan bahan bakar U_3Si_2 , operasi RSG-GAS menggunakan bahan bakar U_3O_8 . Alasan penggantian U_3O_8 dengan U_3Si_2 adalah karena bahan bakar U_3Si_2 mempunyai beberapa keunggulan yaitu ditunjukkan oleh densitas U_3Si_2

(12,2 gram/cm³) yang lebih besar dibanding densitas U_3O_8 sebesar 8,4 gram/cm³).

Untuk mengoptimalkan penggunaan bahan bakar, pengembangan bahan bakar silisida U_3Si_2-Al dengan tingkat muat sebesar 4,8 gram uranium/cm³ pelat sedang dilaksanakan. Pengembangan ini perlu diikuti dengan pengkajian aspek keselamatan operasi. Salah satu aspek keselamatan yang perlu dianalisis adalah keutuhan bahan bakar muatan lebih. Bertambahnya muatan uranium/cm³ pelat akan menambah jumlah produk fisi yang terbentuk. Selama reaktor beroperasi, produk fisi yang terbentuk terkungkung kuat di dalam matrik Al.

Pada kondisi kritis dimana matrik Al dan kelongsong tidak kuat menahan tekanan produk fisi yang semakin banyak volumenya, kelongsong akan membengkak/ *swelling* dan akhirnya kelongsong retak dan pecah. Produk fisi akan keluar ke air pendingin yang selanjutnya menimbulkan kontaminasi dan bahaya radiasi ke pekerja dan lingkungan sekitar. Kondisi ini jelas harus dihindari yaitu dengan mengkaji beberapa aspek yang berpengaruh terhadap keselamatan operasi teras reaktor.

Tulisan ini mengkaji aspek keselamatan yang terkait dengan keutuhan bahan bakar U_3Si_2 -Al muatan lebih yang sedang dikembangkan dengan cara menganalisis terbentuknya produk fisi berupa gas yang terkungkung di dalam matrik Al dan kelongsong $AlMg_2$. Jumlah produk fisi harus dibatasi dengan cara membatasi tingkat fraksi bakar.

TEORI

Aspek utama keselamatan dalam mengoperasikan reaktor nuklir adalah menjaga agar radiasi tidak keluar dari kungkungannya karena mengancam keselamatan pekerja dan lingkungan. Sumber radiasi berasal dari produk fisi yang ditimbulkan selama operasi reaktor. Untuk menjaga agar produk fisi tetap terkungkung di dalam matrik bahan bakar, kelongsong harus cukup kuat dan mampu mempertahankan keutuhan bahan bakar selama masa tinggalnya di dalam reaktor dan juga selama masa penyimpanannya di dalam kolam penyimpanan bahan bakar bekas.

Produk fisi yang berupa gas dan terbetuk selama reaktor beroperasi akan mengisi ruang kosong (*void*) yang ada di dalam *meat* bahan bakar. Apabila ruang kosong tersebut sudah tidak mampu lagi menampung gas hasil fisi, maka gas hasil fisi akan menekan kelongsong bahan bakar yang mengakibatkan kelongsong mengalami pembeng-

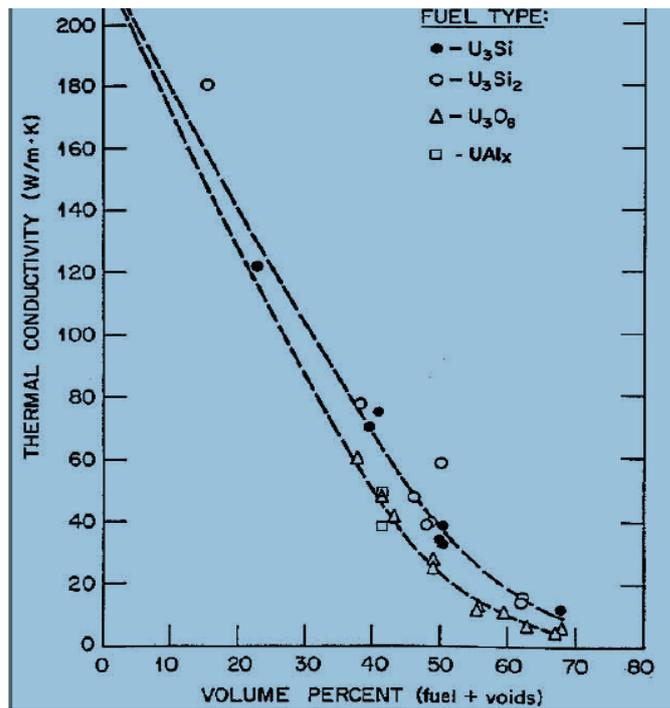
kakan. Pembengkakan merupakan fungsi dari rapat fisi atau fraksi bakar.

Bahan bakar yang sedang dikembangkan untuk operasi teras RSG-GAS adalah bahan bakar jenis U_3Si_2 -Al dengan densitas U_3Si_2 sebesar 12,2 gram/cm³. Muatan uranium dalam bahan bakar yang sedang dikembangkan adalah 4,8 gram U/cm³ pelat. Batasan rapat fisi/pembelahan yang diijinkan untuk bahan bakar LEU, U_3Si_2 adalah $15,7 \times 10^{27}$ fisi/m³.²⁾ Besarnya rapat pembelahan tergantung produk fisi yang terbentuk selama bahan bakar dibakar di reaktor. Apabila rapat pembelahan terlalu banyak melebihi batas yang diijinkan, pelat bahan bakar akan membengkak karena *void* yang ada di dalam matrik U_3Si_2 -Al sudah tidak mampu lagi menampung gas hasil fisi yang terbentuk. Korelasi antara rapat pembelahan dan tingkat fraksi bakar ditunjukkan dengan persamaan 1.

$$F_m = \frac{\rho \cdot \mu \cdot m \cdot e \cdot B}{X_o \cdot A \cdot (1 + \alpha)} \dots\dots\dots(1)^2$$

- F_m = rapat pembelahan
- ρμm = rapat uranium di dalam meat
- e = pengkayaan U_{235}
- N = bilangan Avogadro = $6,022 \times 10^{23}$
- B = tingkat fraksi bakar
- X_b = fraksi U_{235} yang berfisi
- A = berat molekul U_{235}
- α = perbandingan antara tangkapan pembelahan neutron = 0,19

Aspek lain yang perlu dikaji adalah kenaikan temperatur *meat* bahan bakar karena dengan bertambahnya muatan uranium, konduktivitas akan turun yang akhirnya akan menaikkan temperatur *meat* seperti ditunjukkan pada Gambar 1 dibawah



Gambar 1. Thermal konduktiviti Vs volume % (fuel + void) ³⁾

Temperature *meat* U₃Si₂ dihitung dengan persamaan

$$t = x \cdot q'' / k(2) \dots\dots\dots (2) \quad ^3)$$

- t = penurunan suhu di dalam *meat* bahan bakar
- q'' = fluks panas maksimum yang dibangkitkan di teras
- x = tebal *meat* bahan bakar
- k = konduktivitas U₃Si₂

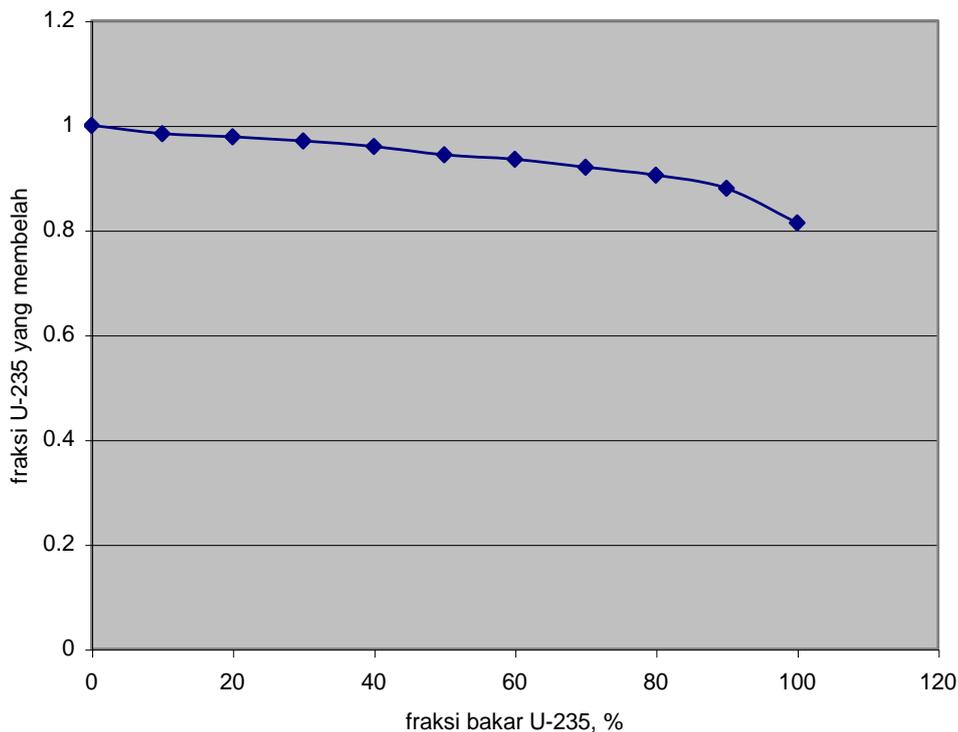
Keutuhan bahan bakar dipertahankan dengan membatasi beban panas dan beban mekanik yang diderita oleh kelongsong, sehingga keretakan kelongsong dapat dihindari. Beban mekanik disebabkan oleh tekanan pendingin reaktor, sedang tekanan dalam berasal dari tekanan gas hasil fisi dan tekanan karena termal stress.

PERHITUNGAN :

- Basis perhitungan *swelling* :
- Rapat uranium di dalam *meat* bahan bakar U₃Si₂ = 4,8 gram U / cm³
- Pengkayaan = 19,75 %
- ρ U₃Si₂ = 12,2 gram U / cm³
- Tingkat fraksi bakar = 72 %

Rapat pembelahan U235 di dalam *meat* bahan bakar dihitung dengan persamaan 1

$$F_m = \frac{\rho \cdot \mu \cdot m \cdot e \cdot B}{X_o \cdot A \cdot (1 + \alpha)}$$



Gambar 2. Tingkat fraksi bakar terhadap fraksi U235 yang berfisi

Mengacu pada Gambar 2 yang menunjukkan korelasi antara fraksi bakar terhadap fraksi U235 yang membelah, diperoleh $X_b = 0,915$

Dengan menggunakan persamaan 1 didapat :

$$F_m = 1,249 \times 10^{21} \text{ fisi/cm}^3$$

Fraksi volume di dalam *meat*, V_F

$$\rho_u \text{ di dalam } U_3Si_2 = \frac{BAU}{BM.U_3Si_2} \times \rho_{U_3Si_2}$$

ρ_u = densitas uranium

BA U = berat atom uranium

BM = berat molekul

$\rho_{U_3Si_2}$ = densitas $U_3Si_2 = 12,2 \text{ gram/cm}^3$

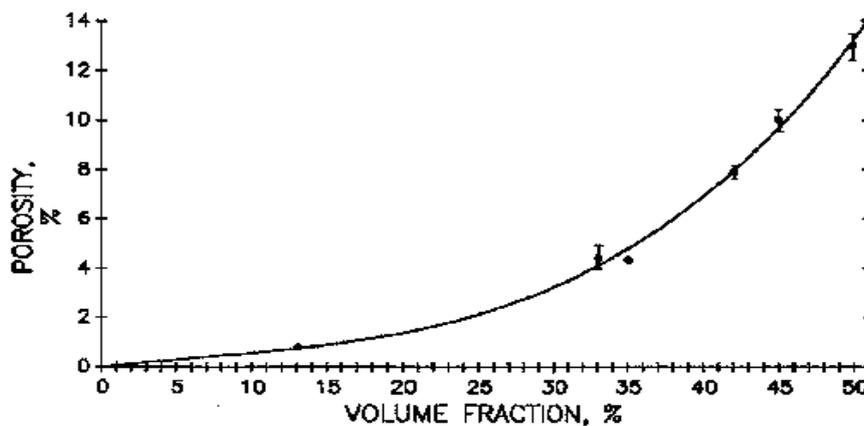
sehingga diperoleh ρ_u di dalam $U_3Si_2 = 11,31 \text{ gram/cm}^3$

Fraksi volume bahan bakar di dalam *meat*, V_F

$$V_F = \frac{\text{rapat uranium di dalam } meat / \rho_u \text{ di dalam } U_3Si_2}{\rho_u \text{ di dalam } U_3Si_2} = 0,425$$

Fraksi volume void, V_p

Berdasarkan data pengukuran yang didapat dari ANL, fraksi *void* U_3Si_2 diperoleh dari grafik yang ditunjukkan pada Gambar 3 di bawah.



Gambar 3. : Fraksi volume bahan bakar dalam *meat* Vs porositas. ⁴⁾

Atau dapat dihitung dengan persamaan :

$$V_p = 0,072 V_F - 0,275(V_F)^2 + 1,32(V_F)^3 \dots\dots 3)^5$$

V_p = fraksi volume *void*

V_F = fraksi volume bahan bakar di dalam *meat* = 0,425

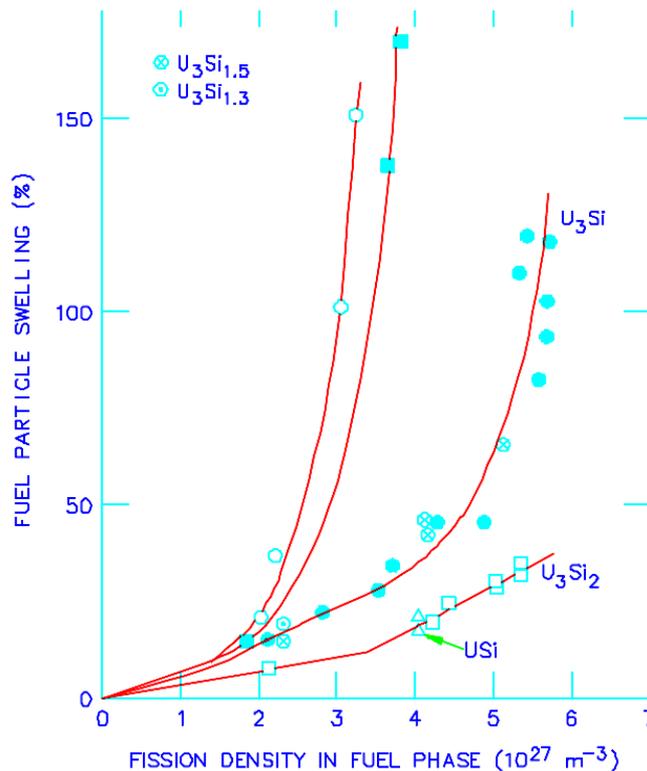
Dengan menggunakan Gambar 3. atau persamaan 3 tersebut diatas diperoleh harga $V_p = 0,082$

Fraksi volume bahan bakar dan fraksi volume *void* = 0,425 + 0,082 = 0,507

Rapat pembelahan U_{235} di dalam bahan bakar, F_F

$$F_F = F_M/V_F = 1,249 \times 10^{21} / 0,425 = 2,939 \times 10^{21} \text{ fisi/cm}^3$$

Prosentasi perubahan volume bahan bakar



Gambar 4. : Rapat pembelahan Vs pembengkakan

Dari **Gambar 4**, yang menyatakan hubungan *swelling* dari U_3Si_2 terhadap rapat pembelahan, dapat dibaca bahwa pada $F_F = 2,939 \times 10^{21}$ diperoleh harga *swelling* /pembengkakan, $(\Delta V_F) = 0,1 \%$

Pertambahan volume di dalam $1 \text{ cm}^3 \text{ meat}$, ΔV_F

$$\begin{aligned} \Delta V_F &= 0,1 \times V_F \\ &= 0,1 \times 0,425 \\ &= 0,0425 \text{ cm}^3 / \text{cm}^3 \text{ meat} \end{aligned}$$

Perhitungan Suhu Meat Bahan Bakar

Diasumsikan bahwa rapat daya reaktor tetap, karena disain reaktor tidak berubah. Muatan lebih dari U_3Si_2 dikompensasi dengan penambahan batang kendali. Mengacu kepada SAR RSG-GAS Revisi 10, suhu *meat* bahan bakar daya nominal adalah $144,98^\circ\text{C}$.⁶⁾ Pada kondisi daya nominal, teras reaktor terdiri dari 960 plat elemen bakar

$$\text{Total volume meat} = p_m \times l_m \times t_m \times 960 = 19518 \text{ cm}^3$$

Daya nominal teras = 30 Mwatt = 30 000 000 watt

Rapat daya rata-rata = daya nominal teras/ volume *meat* = 1537 W/cm^3

Luas perpindahan panas/ cm^3 *meat*

$$\begin{aligned} &= 2 \times \text{luas penampang plat/ vol. meat} \\ &= 37,04 \text{ cm}^2 / \text{cm}^3 \end{aligned}$$

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

$$= 41,5 \text{ W/cm}^2$$

Fluks panas maksimum = (fluks panas rata-rata)(faktor puncak daya) = $221,7 \text{ W/cm}^2$

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

Tebal meat = 0,038cm

$k U_3Si_2$ -Al = $1,07 \text{ W/cm}^\circ\text{K}$ (muatan $U = 2,96 \text{ gram/cm}^3$ pelat).⁶⁾

Mengacu pada Gambar 1, $k U_3Si_2$ -Al (muatan 4,8 gram/ cm^3 pelat, $V_{(F+P)} = 0,507$) diperoleh harga konduktivitas U_3Si_2 sebesar $0,28 \text{ W/cm}^\circ\text{K}$

Untuk muatan 2,96 gram/cm³ pelat

$$\Delta \text{ tm U}_3\text{Si}_2 = (\frac{1}{2} \text{ tebal meat})(q_{\text{ maks}})/k \text{ U}_3\text{Si}_2\text{-Al} \\ = 3,94 \text{ }^\circ\text{C}$$

Untuk muatan 4,8 gram/cm³ pelat

$$\Delta \text{ tm U}_3\text{Si}_2 = (\frac{1}{2} \text{ tebal meat})(q_{\text{ maks}})/k \text{ U}_3\text{Si}_2\text{-Al} \\ = 15,04 \text{ }^\circ\text{C}$$

Perbedaan $\Delta \text{ tm U}_3\text{Si}_2$ muatan 2,96 gram/cm³ pelat dan 4,8 gram/cm³ pelat adalah 11.1 $^\circ\text{C}$

Analisis Thermal Stress

Rapat daya rata-rata = 1537 W/ cm³

$$\text{Thermal stress} = E.\alpha K.H.a^2/ 12(1 - \mu)k \dots\dots\dots 4)$$

E = modulus elastisitas kelongsong = 66000 N/mm²

αK = koefisien ekspansi panas kelongsong = 23,4 x 10⁻⁶/ $^\circ\text{K}$

H = panas yang dibangkitkan dalam 1 cm³ pelat elemen bakar

M = poisson ratio = 0,35

K = konduktivitas kelongsong = 2,16 W/ $^\circ\text{K}$

a = tebal kelongsong = 0,38mm

Dengan menggunakan persamaan 4, diperoleh $\text{thermal stress} = 0,2 \text{ N/mm}^2$

Tekanan pendingin reaktor = 1,997 atm = 19,97 N/mm².¹⁾

Tekanan total yang diterima kelongsong = 20,17 N/mm²

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari hasil perhitungan diatas dapat diperoleh data sbb :

1. Dengan dasar perhitungan fraksi bakar 72%, daya 30 Mwat, fluks neutron 2,24 x 10¹⁴n/cm dt, waktu iradiasi 5400 jam dan tingkat muat uranium 4,8 gramU/cm³ pelat, rapat pembelahan yang terjadi adalah 2,939. 10²⁷ fisi/m³. Rapat fisi maksimum yang diijinkan untuk LEU U₃Si₂ adalah 15,7 x 10²⁷ fisi/m³.
2. Pada muatan uranium lebih tinggi, menghasilkan fraksi volume bahan bakar dan void lebih tinggi juga. Akibatnya konduktivitas panas menurun (gambar 4). Akibat lanjut adalah bahwa temperatur di *meat* bahan bakar sedikit naik yaitu sebesar 11,1 $^\circ\text{C}$. Meskipun ada kenaikan temperatur di *meat* bahan bakar, kenaikan ini masih di bawah batas yang diijinkan. Temperatur di *meat* bahan bakar menjadi 156,08 $^\circ\text{C}$. Batas keselamatan temperatur *meat* bahan bakar seperti yang disebutkan di dalam Laporan Analisis Keselamatan RSG-GAS adalah 200 $^\circ\text{C}$.
3. Berdasarkan perhitungan teori fraksi volume *void* yang terbentuk pada waktu fabrikasi adalah sekitar 0,082. Harga ini berbeda-beda tergantung

pihak pembuat karena teknologi yang digunakan berbeda-beda. Dengan tingkat muat uranium 4,8 gram/cm³, dan kondisi seperti yang disebutkan pada butir1, fraksi volume *meat* bertambah 0,0425. Pertambahan ini masih dapat dikompensasi oleh volume *void* dengan fraksi volume 0,082. Volume *void* memang disediakan untuk menampung gas hasil fisi yang terbentuk.

4. Tekanan total yang diterima kelongsong adalah sebesar 20,17 N/mm². *Yield strength* material ALMg2 adalah 29 N/mm². Dapat diketahui bahwa kelongsong masih berada pada daerah elastis atau daerah aman.
5. Perlu dilakukan pengkajian lanjut untuk mengetahui kelayakannya ditinjau dari aspek neutronik teras reaktor.

KESIMPULAN

Dari hasil pengkajian bahan bakar U₃Si₂ muatan lebih yaitu 4,8 gram U/ cm³, dapat disimpulkan bahwa

- o Dari segi keutuhan bahan bakar itu sendiri masih aman karena produk fisi yang terbentuk belum sampai membengkakan bahan bakar, batas keselamatan masih dipenuhi. Temperatur *meat* bahan bakar juga masih pada daerah aman yaitu 156,08 $^\circ\text{C}$. Batas keselamatan temperatur *meat* bahan bakar adalah 200 $^\circ\text{C}$. Kelongsong masih berada pada daerah elastis
- o Pengkajian lanjut perlu dilakukan untuk mengoptimalkan penggunaannya dalam operasi teras reaktor
- o Faktor ekonomi merupakan faktor yang tak kalah pentingnya dalam mengembangkan kemajuan teknologi sehingga tindak lanjut pengkajian perlu segera dipikirkan

DAFTAR PUSTAKA

1. ANONIM, Laporan Analisis Keselamatan, RSG-GAS Revisi 10
2. COPELAND, G.L, "Performance of Low Enriched U3Si2-Al Dispersion Fuel Elements in The Oak Ridge Research Reactor"
3. SNELLGROVE, J.L, Domagala, R.F, "The Use of U3Si2 Dispersed in Plate Type Fuel Elements Research and Test Reactors" Argon National Laboratory, Argonne, Illinois.
4. ANONIM, ORNL-2127 Part 1, Volume 2, Oak Ridge National Laboratory
5. ANONIM, IAEA TECDOC-643, "Research Reactor Core Conversion Guidebook" Volume 4 : Fuel, Appendix : I - K
6. ANONIM, Research Manufacturing Interface, Bahan Training , MPI

DISKUSI

Penanya : Agoes Soejoedi

Pertanyaan :

- Mohon tanggapan ibu, apakah kerapatan riil nantinya menjadi 4,8, maka sebaiknya nilai burn-up diusahakan menjadi 64-72% jadi aspek ekonomi juga ada ?

Jawaban :

- Pengkajian perlu dilakukan untuk mengusahakan fraksi bakar dapat dinaikkan 64-72 % sehingga dari segi ekonomi ada keuntungannya.

Penanya : Syafrul

Pertanyaan :

- Pengaruh pertambahan suhu yang timbul terhadap kemampuan pendingin ?

Jawaban :

- Dengan tingkat muat $4,8 \text{ gr/cm}^3$, menyebabkan konduktivitas panas U_3Si_2 turun \rightarrow suhu bahan bakar naik sebesar $11,1^\circ\text{C}$. Suhu meat bahan bakar menjadi $156,08^\circ\text{C}$, dimana ini masih dibawah suhu maksimum yang diijinkan yaitu 200°C sehingga reaktor masih aman.

Penanya : Koes Indra K

Pertanyaan :

- Saat ini sedang dikembangkan bahan bakar U_3Si_2 tingkat muat $4,8 \text{ g/cm}^3$, apakah bahan bakar tersebut telah selesai di iradiasi da bagaimana untuk kedepannya apa akan diproduksi sesuai dengan spesifikasi bahan bakar saat ini.

Jawaban :

- Bahan bakar muat $4,8 \text{ gr/cm}^3$ saat ini sedang dalam proses iradiasi di teras reaktor. Kedepannya memang direncanakan untuk digunakan setelah memenuhi persyaratan yang dibuat oleh BAPETEN.