
EVALUASI PERILAKU *SWELLING* IRADIASI BAHAN BAKAR RSG–GAS

Bambang Herutomo, Tri Yulianto
Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir – BATAN, Serpong

ABSTRAK

EVALUASI PERILAKU *SWELLING* IRADIASI BAHAN BAKAR RSG-GAS. Telah dilakukan evaluasi terhadap perilaku *swelling* iradiasi bahan bakar RSG-GAS. Evaluasi dimaksudkan untuk mendukung program perbaikan daya-guna bahan bakar melalui peningkatan derajat bakar bahan bakar setinggi mungkin. Bahan bakar yang dievaluasi adalah bahan bakar uranium pengayaan rendah tipe dispersi U_3Si_2-Al ($2,96 \text{ gr U/cm}^3$) bentuk pelat lurus (*MTR box shape fuel element*). Evaluasi didasarkan atas data hasil perhitungan program komputer DART untuk iradiasi kondisi tunak pada daya nominal RSG-GAS (30 MW termal). Hingga derajat bakar mencapai sekitar 100% U^{235} , efek *swelling* iradiasi untuk iradiasi kondisi tunak terhadap integritas mekanik kelongsong dan unjuk kerja termik bahan bakar dapat diabaikan (masih dalam batas toleransi disain). Hal ini menunjukkan bahwa pada dasarnya bahan bakar silisida yang digunakan RSG-GAS saat ini dapat diiradiasi hingga derajat bakar mencapai 100% U^{235} terbakar.

KATA KUNCI: *Swelling*, Iradiasi, Bahan bakar dispersi U_3Si_2-Al , Uranium pengayaan rendah, Program komputer DART

ABSTRACT

EVALUATION OF IRRADIATION SWELLING BEHAVIOUR OF RSG-GAS FUEL. Evaluation of irradiation swelling behaviour of RSG-GAS fuel has been performed. The evaluation is intended to support the fuel utilization improvement program by increasing the fuel discharge burnup as high as possible. Fuel that has been evaluated is dispersion type of low enriched uranium of U_3Si_2-Al (2.96 gr U/cm^3) in the form of straight plate (*MTR box shape fuel element*). The evaluation is based on DART calculation results for steady-state irradiation at RSG-GAS nominal power (30 MW thermal). Up to fuel burnup of 100% U^{235} , the effect of fuel swelling for steady state irradiation on the mechanical integrity of fuel cladding and the thermal performance of the fuel can be ignored (within the design tolerance). This indicates that the silicide fuel being used in RSG-GAS basically can be irradiated until fuel burnup as high as 100% U^{235} .

FREE TERMS: *Swelling*, Irradiation, U_3Si_2-Al dispersion fuel, Low enriched uranium, DART computer program

I. PENDAHULUAN

Reaktor Serba Guna - G.A. Siwabessy (RSG-GAS) merupakan reaktor penelitian dan uji material (*Material Testing Reactor, MTR*) pertama di dunia yang dirancang khusus menggunakan bahan bakar uranium pengayaan rendah (kandungan U^{235} di dalam uranium kurang dari 20% berat). Berdasarkan disainnya, RSG-GAS memiliki daya nominal 30 MW (termal), bahan bakar dispersi U_3O_8-Al dengan densitas uranium sekitar $2,96 \text{ g/cm}^3$ dan pengayaan U^{235} sekitar 19,75% U. Pada teras seimbang (30 MW, 25 hari

per siklus), derajat bakar rata-rata bahan bakar di dalam teras adalah 23,3% U^{235} pada awal siklus dan 31,3% U^{235} pada akhir siklus. Rerata derajat bakar pada saat ditarik ke luar teras (*discharge burnup*) adalah 54,6% U^{235} [1,2].

Dalam usaha meningkatkan kinerja operasi reaktor sekaligus mengurangi biaya bahan bakar, telah direncanakan untuk memuat teras RSG-GAS dengan bahan bakar dispersi silisida (U_3Si_2-Al) berdensitas uranium sekitar $3,55 \text{ g/cm}^3$. Dengan bahan bakar ini, umur siklus operasi reaktor dapat diperpanjang dari 25 hari menjadi sekitar 33 hari dengan daya penuh [4,5]. Alasan utama digunakannya bahan bakar dispersi U_3Si_2-Al adalah adanya keterbatasan densitas uranium di dalam bahan bakar dispersi U_3O_8-Al , yaitu maksimum sekitar $3,2 \text{ g/cm}^3$ (densitas uranium di dalam bahan bakar dispersi U_3Si_2-Al dapat mencapai sekitar 6 g/cm^3) [3]. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa unjuk kerja iradiasi bahan bakar dispersi U_3Si_2-Al lebih baik dibandingkan U_3O_8-Al . Lisensi penggunaan bahan bakar dispersi U_3Si_2-Al di MTR dengan densitas uranium sampai $4,8 \text{ g/cm}^3$ telah dikeluarkan oleh US-NRC pada bulan Juli 1988 [6].

Sebagai langkah transisi ke teras silisida di atas, saat ini teras RSG-GAS telah diisi penuh dengan bahan bakar dispersi U_3Si_2-Al yang memiliki densitas uranium sama dengan densitas uranium pada bahan bakar dispersi U_3O_8-Al , yaitu sekitar $2,96 \text{ g/cm}^3$. Sejalan dengan hal tersebut, operator RSG-GAS juga berkeinginan untuk meningkatkan daya guna bahan bakar melalui peningkatan derajat bakar buang (*discharge burnup*) bahan bakar setinggi mungkin ($> 54,6\% U^{235}$ terbakar) tanpa harus mengorbankan kinerja dan keselamatan operasi reaktor [8]. Peningkatan derajat bakar berarti pengurangan biaya operasi untuk pembelian bahan bakar baru dan penyimpanan bahan bakar bekas.

Untuk mendukung program peningkatan derajat bakar di atas, perlu dilakukan suatu evaluasi perilaku iradiasi bahan bakar U_3Si_2-Al , khususnya yang berkaitan dengan *swelling*. Mengingat uji iradiasi bahan bakar silisida di teras RSG-GAS belum pernah dilakukan hingga derajat bakar mencapai $> 60\% U^{235}$ (rata-rata), maka dalam makalah ini dilakukan perhitungan program komputer DART dari ANL-USA. Input penting dalam melakukan perhitungan dengan DART meliputi antara lain kondisi operasi bahan bakar (temperatur, laju fisi) dan data disain daging bahan bakar (ukuran partikel bahan bakar, fraksi volume bahan bakar, fraksi volume porositas). Dalam evaluasi ini, derajat bakar maksimum yang dapat dicapai ditentukan berdasarkan pada perilaku *swelling* iradiasi kondisi tunak (*steady state*) daya nominal RSG-GAS (30 MW) hingga derajat bakar mencapai sekitar $100\% U^{235}$ terbakar, dan hanya bagian pelat bahan bakar yang mengalami iradiasi terberat (daya dan temperatur tertinggi) yang ditinjau, baik untuk bahan bakar yang diiradiasi di teras rata-rata maupun di teras terpanas.

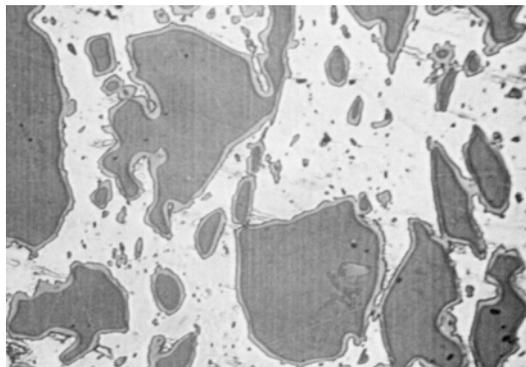
II. TEORI

Aspek penting yang perlu diperhatikan dalam peningkatan derajat bakar adalah penambahan volume bahan bakar (*swelling*) yang berakibat pada bertambahnya ketebalan pelat bahan bakar. *Swelling* pada bahan bakar dispersi terutama disebabkan oleh akumulasi hasil fisi, baik gas maupun padat, dan fasa hasil interaksi kimiawi antara partikel bahan bakar dengan matrik aluminium [9,10]. Mengingat tebal saluran pendingin di antara dua pelat bahan bakar RSG-GAS hanya sekitar $0,255 \text{ cm}$ [1,2], maka penambahan ketebalan yang terjadi pada pelat bahan bakar dikuatirkan akan mengganggu aliran pendingin yang menyebabkan kenaikan temperatur operasi bahan

bakar. *Swelling* juga menyebabkan perubahan konduktivitas panas daging bahan bakar. Kenaikan temperatur bahan bakar akan memperbesar laju *swelling* sehingga pelat bahan bakar semakin bertambah tebal dan gangguan terhadap aliran pendingin juga meningkat (berlangsung *feedback effect*). *Swelling* yang berlebihan dapat merusak integritas kelongsong sehingga hasil fisi dapat terlepas ke pendingin atau lingkungan. Perilaku *swelling* bahan bakar tipe dispersi antara lain dipengaruhi oleh laju fisi, temperatur, jenis bahan bakar, sifat mekanik matrik aluminium, dan bentuk bahan bakar (pelat, *rod* atau *annular*)^[10].

Bahan bakar dispersi U_3Si_2 -Al memiliki perilaku *swelling* (stabilitas dimensional) relatif baik selama iradiasi. *Swelling* berlebihan atau *breakaway swelling* yang disebabkan oleh saling kontak antar gelembung gas hasil fisi tidak pernah terjadi pada jenis bahan bakar ini^[14]. Berbeda dengan bahan bakar dispersi U_3O_8 -Al, pori hasil fabrikasi pada bahan bakar dispersi U_3Si_2 -Al tidak mengalami *sintering* akan tetapi akan menutup sesuai dengan kenaikan volume partikel bahan bakar. Kenaikan volume daging bahan bakar akan terjadi apabila seluruh pori hasil fabrikasi telah tertutup semuanya^[10]. *Swelling* partikel bahan bakar terutama berasal dari akumulasi hasil fisi (padat dan gas) dan fasa aluminida ($U_3Al_7Si_2$ sebagai hasil interaksi kimiawi antara partikel bahan bakar dengan matrik aluminium^[15,16,17]). Meskipun fasa aluminida tersebut menyebabkan kenaikan volume cukup signifikan pada partikel bahan bakar, akan tetapi secara keseluruhan tidak menyebabkan kenaikan volume daging bahan bakar^[10,14]. Efek iradiasi terhadap struktur mikro bahan bakar dispersi U_3Si_2 -Al dapat dilihat pada Gambar 1^[16]. Terjadinya lapisan tipis aluminida yang melingkupi partikel bahan bakar terlihat dalam gambar.

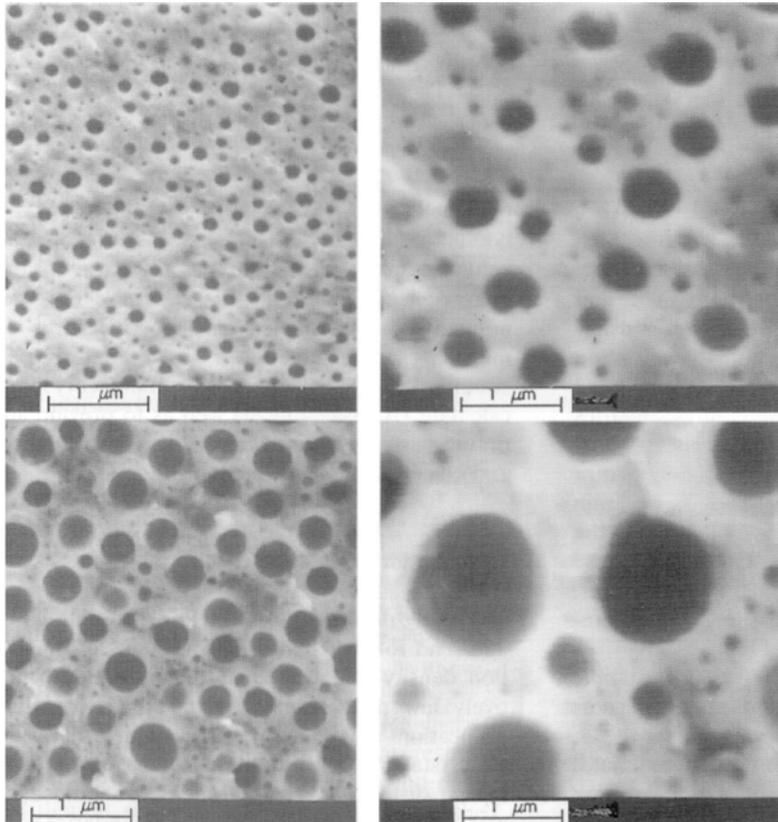
Swelling pada bahan bakar U_3Si_2 akibat akumulasi gas hasil fisi menunjukkan perilaku mirip dengan bahan bakar UO_2 , yaitu *swelling* naik tajam setelah iradiasi mencapai densitas fisi tertentu. Hal ini dikarenakan gelembung-gelembung gas hasil fisi mulai terbentuk, dan sejalan dengan kenaikan densitas fisi, gelembung-gelembung gas hasil fisi akan tumbuh dan bertambah banyak^[10,13,14]. Pada bahan bakar U_3Si_2 , saling kontak antar gelembung gas hasil fisi tidak pernah terjadi (Gambar 2)^[13].



Gambar 1. Efek iradiasi terhadap struktur mikro bahan bakar U_3Si_2 -Al^[16]

Pembentukan dan pertumbuhan gelembung gas hasil fisi terutama berkaitan dengan peristiwa rekristalisasi, yaitu terbentuknya butiran-butiran halus (*sub-grain*) di

dalam partikel bahan bakar U_3Si_2 akibat iradiasi. Densitas fisi yang menyebabkan rekristalisasi dipengaruhi oleh laju fisi dan temperatur iradiasi. Ukuran dan laju pertumbuhan gelembung-gelembung gas hasil fisi dipengaruhi oleh tekanan hidrostatik dari matrik aluminium dan fasa aluminida yang menyelimuti partikel bahan bakar. Semakin besar tekanan hidrostatik, semakin rendah laju *swelling* akibat gas hasil fisi pada partikel bahan bakar^[10,14,18].



Gambar 2. Morfologi gelembung gas hasil fisi di dalam U_3Si_2 (HEU) pada densitas fisi 9×10^{27} fisi/ m^3 (atas) dan 16×10^{27} fisi/ m^3 (bawah) dan laju fisi 7×10^{20} fisi/ m^3 det^[13]

Program komputer DART (*Dispersion Analysis Research Tool*)^[10,14] menerapkan model termo-mekanik dalam memprediksi *swelling* akibat iradiasi pada bahan bakar dispersi berbasis aluminium, baik untuk kondisi tunak maupun *transient*. DART menghitung *swelling* akibat akumulasi hasil fisi padat dan gelembung gas fisi sebagai fungsi morfologi bahan bakar. Efek rekristalisasi, yaitu terbentuknya butiran halus (*sub-grain*) di dalam partikel bahan bakar karena iradiasi dan efek interaksi kimiawi antara partikel bahan bakar dengan matrik aluminium terhadap laju *swelling* juga

diperhitungkan. DART juga menghitung efek *swelling* terhadap perubahan konduktivitas panas daging bahan bakar.

DART memodelkan partikel bahan bakar sebagai bola yang mengalami deformasi (*swelling*) dan suatu kulit aluminium yang melingkupi partikel bahan bakar yang diasumsikan berkelakuan plastis sempurna dan berdeformasi ketika partikel bahan bakar mengalami *swelling*. Pengaruh kelongsong diperhitungkan dengan menggunakan fraksi volume efektif aluminium. Efek mulur (*creep*) dan efek pengerasan (*work hardening*) tidak secara eksplisit disertakan dalam DART. Sebagai gantinya, dilakukan penurunan nilai tegangan luluh (*yield stress*) aluminium ke suatu harga efektif yang mendekati relaksasi tegangan. *Swelling* yang dialami partikel bahan bakar menyebabkan deformasi pada matrik aluminium dan menimbulkan tegangan antar-muka antara partikel bahan bakar dengan matrik. Tegangan ini diidentifikasi sebagai tegangan hidrostatik yang mempengaruhi laju *swelling* akibat pembentukan dan pertumbuhan gelembung-gelembung gas fisi. Tegangan hidrostatik rata-rata di dalam partikel bahan bakar ditentukan dengan persamaan sebagai berikut^[10, 14].

$$P_h = \frac{2}{3} \left[1 - \ln \left(\frac{V_0^f + \Delta V^f}{V_0^c} \right) \right] \beta S_{Al}^Y \quad (1)$$

V_0^f / V_0^c adalah fraksi volume bahan bakar hasil fabrikasi, $\Delta V^f / V_0^c$ adalah kenaikan fraksi volume bahan bakar akibat *swelling*, S_{Al}^Y adalah tegangan luluh aluminium, β adalah faktor fenomena untuk memperhitungkan efek iradiasi seperti *creep* dan *hardening*. Harga β yang dipergunakan untuk bahan bakar dispersi tipe pelat adalah 0,133.

Interaksi kimiawi antara partikel bahan bakar dengan matrik aluminium menyebabkan terbentuknya suatu kulit berupa fasa hasil interaksi yang melingkupi partikel bahan bakar. Kulit ini berkembang (bertambah tebal) sejalan dengan waktu dan bertindak sebagai tambahan kekangan (*restraint*) terhadap pembentukan dan pertumbuhan gelembung gas hasil fisi di dalam partikel bahan bakar. Oleh karena kulit fasa hasil interaksi ($U_3Al_7Si_2$) pada bahan bakar U_3Si_2 -Al bersifat keras dan berdeformasi (laju *swelling*) lebih lambat dibandingkan U_3Si_2 maka pengaruhnya harus diperhitungkan dengan cara memodifikasi rumus tegangan hidrostatik pada persamaan (1) di atas menjadi^[14]:

$$P_h = \frac{2}{3} [1 - \ln(vfma)] S_{alu\ min\ ida}^Y \quad (2)$$

vfma adalah rasio antara volume bahan bakar yang tidak bereaksi dengan volume total partikel bahan bakar, dan $S_{alu\ min\ ida}^Y$ adalah tegangan luluh $U_3Al_7Si_2$.

Dalam memprediksi *swelling* akibat gas hasil fisi, DART mengadopsi model mekanistik GRASS-SST (*Gas Release And Swelling Subroutine - Steady State and Transient*). GRASS-SST memprediksi *swelling* akibat gas hasil fisi berdasarkan

penyelesaian persamaan diferensial tak linier yang menggambarkan konsentrasi atom dan gelembung gas hasil fisi, baik di dalam maupun di batas butir^[10,14], yaitu:

$$\frac{dC_i^\alpha}{dt} = -a_i^\alpha C_i^\alpha C_i^\alpha - b_i^\alpha C_i^\alpha + e_i^\alpha \quad (3)$$

$$(i = 1, 2, \dots, N, \alpha = 1, 2, 3, 4)$$

C_i^α adalah konsentrasi gelembung gas hasil fisi tipe- α , kelompok ukuran ke- i . $\alpha = 1, 2, 3, 4$ masing-masing mewakili kisi (*lattice*), dislokasi, permukaan butir, dan pojok butir (*grain edge*). Koefisien-koefisien a_i^α , b_i^α dan e_i^α mengikuti hubungan fungsional dalam bentuk:

$$a_i^\alpha = a_i^\alpha (C_i^\beta)$$

$$b_i^\alpha = b_i^\alpha (C_1^\beta, \dots, C_{i-1}^\beta, C_{i+1}^\beta, \dots, C_N^\beta) \quad (4)$$

a_i^α mewakili laju gelembung tipe- α yang hilang atau tumbuh dari kelas- i karena penggabungan dengan gelembung-gelembung dalam kelas tersebut. b_i^α mewakili laju gelembung tipe- α hilang dari kelas- i , migrasi ke luar struktur, perubahan tipe gelembung akibat migrasi dan pemecahan gelembung. e_i^α mewakili laju gelembung gas masuk ke kelas- i karena pembangkitan gas hasil fisi, pengintian gelembung gas, pertumbuhan gelembung akibat penggabungan, proses migrasi dan penyusutan gelembung gas akibat pemisahan kembali atom gas.

III. TATA KERJA

Perilaku *swelling* akibat iradiasi pada bahan bakar U_3Si_2 -Al RSG-GAS diprediksi dengan program komputer DART. Evaluasi terhadap *margin* keselamatan iradiasi (derajat bakar maksimum) didasarkan atas perilaku *swelling* iradiasi kondisi tunak pada daya nominal (30 MW) hingga derajat bakar mencapai sekitar 100% U^{235} terbakar. Dalam hal ini, hanya bagian pelat bahan bakar yang mengalami iradiasi terberat (daya dan temperatur tertinggi) yang dipertimbangkan, baik untuk bahan bakar yang diiradiasi di teras rata-rata maupun di teras terpanas. Data disain bahan bakar, kondisi iradiasi dan pendekatan yang digunakan dalam perhitungan dengan DART adalah sebagai berikut:

1. Dimensi pelat bahan bakar adalah 62,5 cm (panjang), 7,075 cm (lebar) dan 0,13 cm (tebal). Dimensi daging bahan bakar (dispersi U_3Si_2 -Al) adalah 60 cm (panjang), 6,275 cm (lebar) dan 0,054 cm (tebal). Densitas uranium di dalam daging bahan bakar adalah 2,96 g/cm³ dengan tingkatperkayaan U^{235} sebesar 19,75% berat. Fraksi volume porositas di dalam daging bahan bakar diasumsikan sebesar 2,4%^[1,2,7].
2. Partikel bahan bakar diasumsikan berbentuk bola dengan ukuran seragam, yaitu 60 μ m (diameter), serta memiliki densitas sesuai dengan densitas teoritisnya yaitu 12,2 g/cm³ untuk U_3Si_2 ^[9].

3. Kondisi iradiasi pada daya nominal RSG-GAS (30MW) yang digunakan dalam perhitungan adalah sebagai berikut^[7]:
 - Fluks panas maksimum untuk teras rata-rata dan teras terpanas masing-masing adalah 64,5 W/cm² dan 185,6 W/cm².
 - Temperatur tertinggi permukaan kelongsong bahan bakar di teras rata-rata dan teras terpanas masing-masing adalah 87,8 °C dan 139,6 °C.
4. Berdasarkan kondisi iradiasi di atas, temperatur tertinggi bahan bakar dapat ditetapkan, yaitu sekitar 90,3 °C untuk bahan bakar di teras rata-rata dan 146,8 °C untuk bahan bakar di teras terpanas. Selama iradiasi berlangsung temperatur bahan bakar tersebut diasumsikan konstan dan gradien temperatur di dalam partikel bahan bakar diabaikan dalam perhitungan.
5. Ukuran butir (*grain size*) bahan bakar pra-iradiasi diasumsikan sama dengan ukuran rerata partikel, yaitu 60 µm (diameter), dan ukuran butir setelah rekristalisasi diasumsikan sebesar 0,5 µm (diameter)^[10,13].
6. Daging bahan bakar U₃Si₂-Al pra-iradiasi diasumsikan tersusun atas partikel bahan bakar U₃Si₂, matrik aluminium, dan pori hasil fabrikasi. Fasa lain yang mungkin terbentuk selama fabrikasi seperti U_{ss}, USi, dan U₃Si diabaikan dalam perhitungan. Morfologi partikel bahan bakar selama iradiasi diasumsikan berupa U₃Si₂ yang dilingkupi fasa interaksi U₃Si₇Al^[14].
7. Interaksi kimia antara partikel bahan bakar U₃Si₂ dengan bahan matrik aluminium diasumsikan menyebabkan volume partikel bahan bakar naik sekitar 111 % akan tetapi tidak menyebabkan kenaikan volume daging bahan bakar^[10, 14].



jika ditulis dalam bentuk volume

$$1 \text{ cm}^3 U_3Si_2 + 1,1 \text{ cm}^3 Al \rightarrow 2,11 \text{ cm}^3 U_3Al_7Si_2 \quad (5)$$

8. Kedalaman penetrasi interaksi kimia antara partikel bahan bakar U₃Si₂ dengan matrik aluminium dihitung dengan persamaan sebagai berikut^[11]:

$$y^2 / t = \left(K_0 \exp(-Q_0 / RT) + K_i \exp(-Q_i / RT) F_R \right) \quad (6)$$

dimana $K_0 = 3,74 \cdot 10^{-25} \text{ cm}^2/\text{det}$
 $K_i = 9,27 \cdot 10^{12} \text{ cm}^2/\text{det}$
 $Q_0 = 7182 \text{ kal/mol}$
 $Q_i = 83357 \text{ kal/mol}$
 $F_R = \text{laju fisi.}$

9. Densitas fisi yang menyebabkan rekristalisasi pada bahan bakar U₃Si₂ ditentukan dengan persamaan sebagai berikut^[13]:

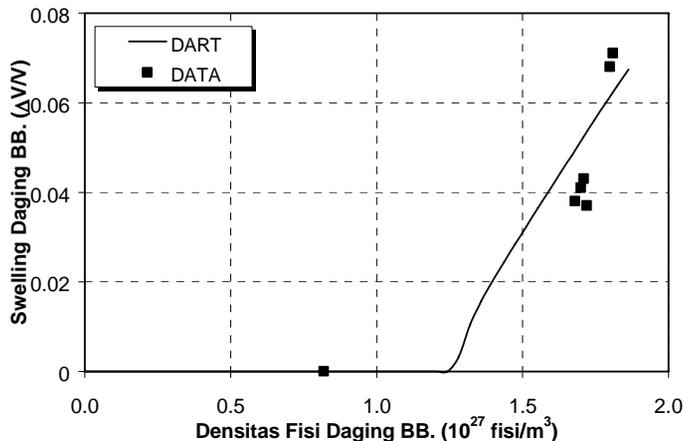
$$FDX = 6,85 \times 10^{13} \frac{\sqrt{F_R}}{T} \exp(5226/T) \quad (7)$$

dimana $T = \text{temperatur iradiasi (K)}$
 $F_R = \text{laju fisi (fisi/m}^3 \text{ det)}$

10. Data lain yang diperlukan seperti koefisien difusi gas hasil fisi di dalam bahan bakar, persyaratan terbentuknya gelembung gas, sifat-sifat fisika dan kimia lainnya diambil dari data yang sudah *buildup* di dalam program DART dan data tersebut diasumsikan cukup valid untuk perhitungan ini.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk memeriksa validitas pemodelan dan asumsi yang digunakan dalam DART, telah dilakukan suatu studi banding antara data perhitungan DART dengan data eksperimen *swelling* akibat iradiasi pada daging bahan U_3Si_2-Al . Berdasarkan hasil dalam Gambar 3 dapat dikatakan bahwa model perhitungan dan asumsi yang digunakan dalam DART cukup valid dalam memprediksi *swelling* bahan bakar akibat iradiasi. Data hasil eksperimen yang digunakan adalah data hasil uji pasca iradiasi pelat mini U_3Si_2-Al dengan fraksi volume bahan bakar (U_3S_2) antara 33,1 - 33,4 % dan fraksi volume pori berkisar antara 4,3 - 5,2%^[16]. Suhu maksimum bahan bakar selama uji iradiasi diperkirakan antara 75 - 125 °C. Dalam perhitungan dengan DART, bahan bakar U_3Si_2-Al diasumsikan memiliki fraksi volume bahan bakar sebesar 33,3% dan fraksi volume pori sebesar 4,7%, dan suhu bahan bakar selama iradiasi diasumsikan konstan, yaitu sebesar 100 °C.

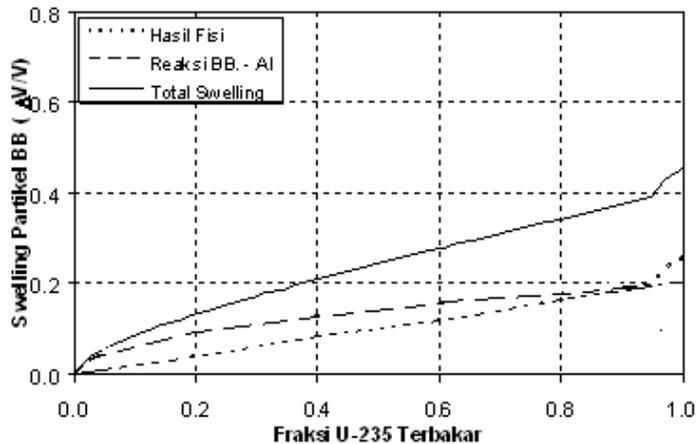


Gambar 3. Perbandingan *swelling* daging bahan bakar (LEU) U_3Si_2-Al antara hasil perhitungan DART dengan data eksperimen ANL^[11,16]

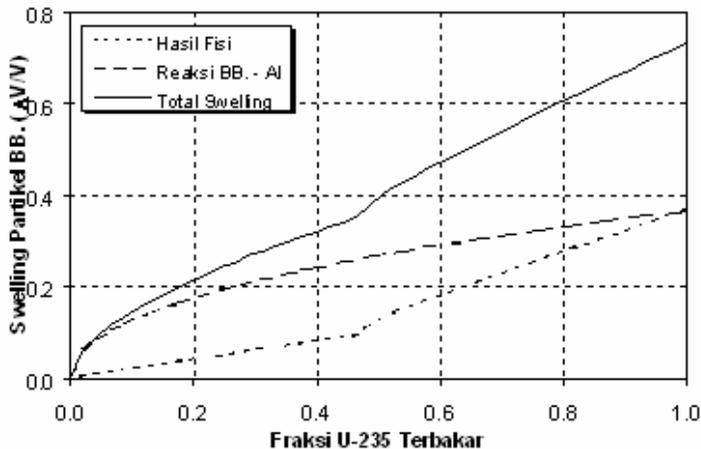
Hasil perhitungan DART tentang perilaku *swelling* akibat iradiasi yang dialami partikel bahan bakar (U_3Si_2) dari pelat bahan bakar U_3Si_2-Al RSG-GAS disajikan dalam Gambar 4. Data hasil perhitungan terhadap dua kondisi iradiasi yang ditinjau (teras terpanas dan teras rata-rata) menunjukkan perbedaan perilaku *swelling* yang cukup signifikan, baik kecenderungan maupun besarnya.

Berdasarkan hasil perhitungan, pada derajat bakar 100 % U^{235} terbakar atau densitas fisi daging bahan bakar sekitar $1,5 \times 10^{27}$ fisi/ m^3 , partikel bahan bakar

mengalami *swelling* atau kenaikan volume ($\Delta V/V$) sekitar 45,6% untuk bahan bakar yang diiradiasi di teras rata-rata dan sekitar 73,5% untuk bahan bakar yang diiradiasi di teras terpanas. Berdasarkan hasil perhitungan juga diketahui bahwa partikel bahan bakar dari bahan bakar yang diiradiasi di teras terpanas mengalami rekristalisasi (ditunjukkan oleh kenaikan tajam kurva *swelling* akibat gas hasil fisi dalam Gambar 4) pada derajat bakar sekitar 43% U^{235} terbakar atau densitas fisi daging bahan bakar sekitar $0,65 \times 10^{27}$ fisi/ m^3 sedangkan rekristalisasi partikel bahan bakar dari bahan bakar yang diiradiasi di teras rata-rata baru terjadi setelah iradiasi mencapai derajat bakar sekitar 95% U^{235} terbakar atau densitas fisi daging bahan bakar sekitar $1,42 \times 10^{27}$ fisi/ m^3 .



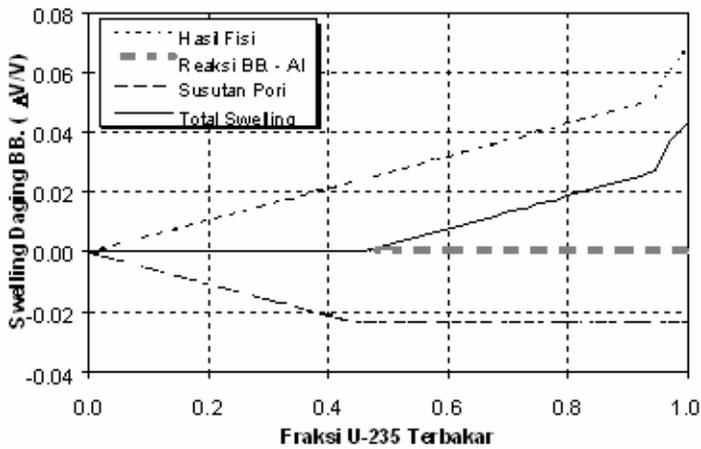
(a)



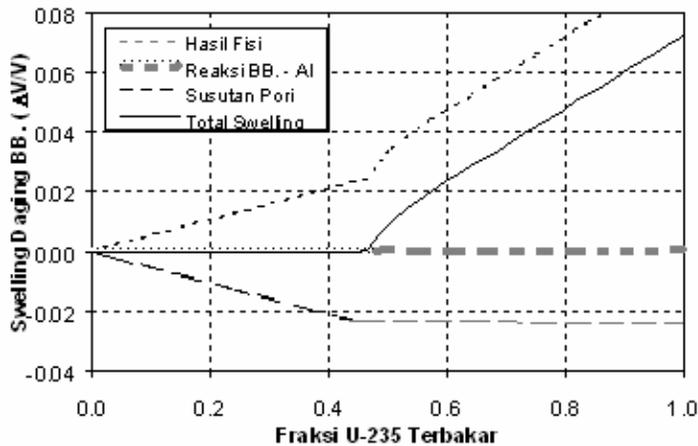
(b)

Gambar 4. *Swelling* partikel bahan bakar di dalam pelat bahan bakar U_3Si_2 -Al RSG-GAS: (a) iradiasi di teras rata-rata, (b) iradiasi di teras terpanas

Meskipun fasa aluminida $U_3Al_7Si_2$ hasil interaksi kimiawi antara partikel bahan bakar U_3Si_2 dengan matrik aluminium menyebabkan kenaikan volume partikel bahan bakar yang cukup signifikan, yaitu sekitar 20% untuk bahan bakar yang diiradiasi di teras rata-rata dan sekitar 36,5% untuk bahan bakar yang diiradiasi di teras terpanas, akan tetapi pembentukan aluminida tersebut tidak menyebabkan kenaikan volume (*swelling*) daging bahan bakar (U_3Si_2 -Al). Hal ini dikarenakan volume matrik aluminium yang bereaksi dengan bahan bakar U_3Si_2 sama dengan volume fasa hasil interaksi $U_3Al_7Si_2$ yang terbentuk^[10,14]. Kenaikan volume atau *swelling* pada daging bahan bakar mulai terjadi apabila semua pori hasil fabrikasi telah tertutup oleh kenaikan volume partikel bahan bakar akibat akumulasi hasil fisi, baik gas maupun padat.



(a)



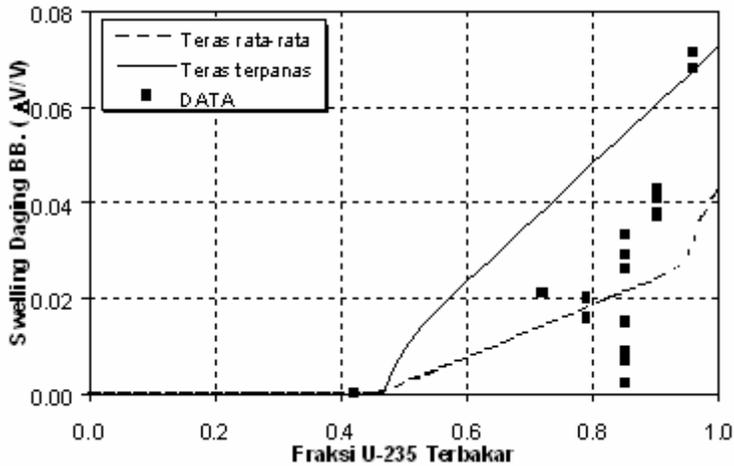
(b)

Gambar 5. *Swelling* daging bahan bakar di dalam pelat bahan bakar U_3Si_2 -Al RSG-GAS, (a) iradiasi di teras rata-rata, (b) iradiasi di teras terpanas

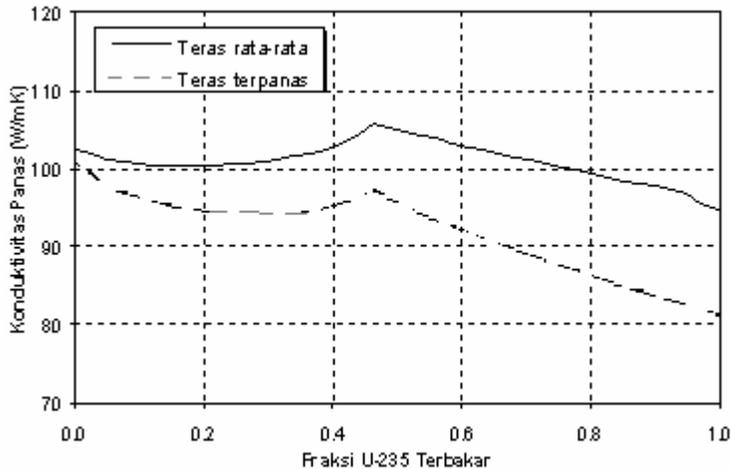
Perilaku *swelling* daging bahan bakar dari pelat bahan bakar U_3Si_2 -Al RSG-GAS hasil perhitungan DART disajikan dalam Gambar 5. Data hasil perhitungan menunjukkan bahwa penutupan pori fabrikasi atau kenaikan volume (*swelling*) daging bahan bakar baru terjadi setelah iradiasi mencapai derajat bakar sekitar 46,4% U^{235} terbakar atau densitas fisi daging bahan bakar sekitar $0,7 \times 10^{27}$ fisi/ m^3 , baik untuk bahan bakar yang diiradiasi di teras rata-rata maupun di teras terpanas. Berdasarkan data hasil perhitungan, pada derajat bakar sekitar 100% U^{235} terbakar, daging bahan bakar mengalami *swelling* atau kenaikan volume ($\Delta V/V$) sekitar 4,3% untuk bahan bakar yang diiradiasi di teras rata-rata dan sekitar 7,3% untuk bahan bakar yang diiradiasi di teras terpanas. Perbandingan *swelling* daging bahan bakar U_3Si_2 -Al RSG-GAS hasil perhitungan DART dengan data *swelling* daging bahan bakar U_3Si_2 -Al hasil eksperimen ANL-USA dapat dilihat dalam Gambar 6. Data *swelling* hasil eksperimen tersebut adalah data hasil uji pasca iradiasi pelat mini U_3Si_2 -Al dengan fraksi volume bahan bakar antara 33,1 – 50% dan fraksi pori antara 4,3 - 13%, dan temperatur bahan bakar selama uji iradiasi di reaktor diperkirakan antara 75 – 125 °C^[16].

Iradiasi menyebabkan fraksi volume bahan penyusun daging bahan bakar (bahan bakar termasuk fasa hasil interaksi, matrik aluminium dan pori) mengalami perubahan dengan naiknya derajat bakar. Data hasil perhitungan menunjukkan bahwa iradiasi hingga derajat bakar mencapai sekitar 100% U^{235} terbakar, fraksi volume matrik aluminium di dalam daging bahan bakar masih cukup besar, yaitu sekitar 63,4% untuk bahan bakar yang diiradiasi di teras rata-rata dan sekitar 57,6% untuk bahan bakar yang diiradiasi di teras terpanas. Kondisi ini berarti kekangan (*restraint*) matrik aluminium terhadap partikel bahan bakar masih cukup besar dalam menahan pertumbuhan gelembung-gelembung gas hasil fisi. Selain itu, masih dominannya matrik aluminium juga bermanfaat dalam menjaga kestabilan konduktivitas panas daging bahan bakar selama iradiasi.

Hasil perhitungan DART tentang konduktivitas panas daging bahan bakar dari pelat bahan bakar U_3Si_2 -Al RSG-GAS selama iradiasi disajikan dalam Gambar 7. Pada awal iradiasi, konduktivitas daging bahan bakar naik sebagai akibat penutupan pori fabrikasi dan mencapai maksimum setelah seluruh pori fabrikasi tertutup. Kemudian, konduktivitas daging bahan bakar menurun perlahan dengan kenaikan derajat bakar yang disebabkan oleh berkurangnya jumlah matrik aluminium di dalam daging bahan bakar dan terbentuknya gelembung-gelembung gas hasil fisi di dalam partikel bahan bakar. Pada derajat bakar 100% U^{235} terbakar, konduktivitas panas daging bahan bakar dari pelat bahan bakar yang diiradiasi di teras terpanas mengalami penurunan sekitar 20%, yaitu dari 100,7 W/mK menjadi 81,2 W/mK, sedangkan konduktivitas panas daging bahan bakar dari pelat bahan bakar yang diiradiasi di teras rata-rata mengalami penurunan konduktivitas panas sekitar 7,6%, yaitu dari 102,4 W/mK menjadi 94,6 W/mK.



Gambar 6. *Swelling* daging bahan bakar di dalam pelat bahan bakar U_3Si_2-Al RSG-GAS dibandingkan dengan data eksperimen dari ANL^[16]



Gambar 7. Efek iradiasi terhadap konduktivitas panas daging bahan bakar di dalam pelat bahan bakar U_3Si_2-Al RSG-GAS

Berdasarkan dimensi pelat bahan bakar, kekangan (*restraint*) dalam arah tebal akan jauh lebih kecil dibandingkan dengan kekangan dalam arah lebar dan panjang sehingga kenaikan volume atau *swelling* ($\Delta V/V$) yang terjadi pada daging bahan bakar dapat dianggap hanya berpengaruh terhadap ketebalan pelat bahan bakar. Oleh karena itu, *swelling* yang dialami daging bahan bakar pada derajat bakar 100% U^{235} terbakar akan menyebabkan pelat bahan bakar mengalami penambahan ketebalan ($\Delta t/t$) sekitar

1,8% untuk elemen bakar yang diiradiasi di teras rata-rata dan sekitar 3% untuk elemen bakar yang diiradiasi di teras terpanas. Penambahan ketebalan tersebut diyakini tidak akan menyebabkan kerusakan integritas mekanik kelongsong. Berdasarkan data hasil uji iradiasi pelat bahan bakar U_3Si_2-Al di ORR (USA)^[15] menunjukkan bahwa integritas mekanik kelongsong masih terjaga meskipun pelat bahan bakar telah mengalami penambahan ketebalan ($\Delta t/t$) sekitar 8 – 10%.

Pertambahan ketebalan pelat bahan bakar tersebut di atas akan menyebabkan tebal saluran pendingin (jarak antara dua pelat bahan bakar) mengalami penyempitan ($\Delta t_p/t_p$) sekitar -0,9% untuk elemen bakar yang diiradiasi di teras rata-rata dan sekitar -1,5% untuk elemen bakar yang diiradiasi di teras terpanas. Apabila penyempitan tersebut diasumsikan merata di sepanjang saluran pendingin maka efek yang ditimbulkan seperti terganggunya pengangkutan panas oleh pendingin dapat diabaikan. Prediksi secara kasar menunjukkan bahwa beda temperatur pendingin keluar dan masuk saluran pendingin ($\Delta T = T_{out} - T_{in}$) hanya naik sekitar 0,8% untuk elemen bakar yang diiradiasi di teras rata-rata dan sekitar 1,6% untuk elemen bakar yang diiradiasi di teras terpanas.

Selain menyebabkan penambahan ketebalan pelat bahan bakar, *swelling* juga menyebabkan perubahan konduktivitas panas daging bahan bakar sehingga temperatur iradiasi bahan bakar juga mengalami perubahan. Apabila rapat daya yang dibangkitkan bahan bakar dan temperatur permukaan kelongsong diasumsikan tidak berubah selama iradiasi (dari 0 – 100% U^{235} terbakar) maka penurunan konduktivitas panas yang terjadi pada daging bahan bakar (U_3Si_2-Al) menyebabkan temperatur bahan bakar yang diiradiasi di teras rata-rata naik sekitar 0,1%, yaitu dari 90,3 °C menjadi 90,4 °C dan temperatur bahan bakar yang diiradiasi di teras terpanas naik sekitar 0,4%, yaitu dari 146,8 °C menjadi 147,4 °C.

V. KESIMPULAN

Perilaku *swelling* akibat iradiasi bahan bakar tipe dispersi uranium perkayaan rendah U_3Si_2-Al yang digunakan RSG-GAS saat ini (2,96 gU/cm³; 19,75% berat U^{235}) telah dievaluasi berdasarkan hasil perhitungan program komputer DART. Untuk iradiasi kondisi tunak pada daya nominal RSG-GAS (30 MW) hingga derajat bakar mencapai sekitar 100% U^{235} terbakar atau densitas fisi daging bahan bakar sekitar $1,5 \times 10^{27}$ fisi/m³, hasil evaluasi secara umum menunjukkan bahwa *swelling* akibat iradiasi yang dialami bahan bakar U_3Si_2-Al masih dalam batas aman dan efek *swelling* terhadap kinerja termik bahan bakar kondisi tunak dapat diabaikan. Hal ini berarti bahwa bahan bakar silisida yang digunakan RSG-GAS saat ini mampu diiradiasi hingga derajat bakar mencapai 100% U^{235} terbakar.

VI. UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Dr. Ir. Hadi Suwarno, M.Eng, Ir. Widjaksana, Dr. Ir. Suwardi, dan Winter Dewayatna, S.T. atas saran dan kritiknya terutama dalam penulisan makalah ini.

VI. DAFTAR PUSTAKA

1. BATAN, "Safety Analysis Report", 1989.

2. AHIMSA, D., SUPADI, S., SOENTONO, S., HERSUBENO, J.B., dan SUWARDI, "Indonesian Multi Purpose Reactor RSG-GAS", 8th Pacific Basin Nuclear Conference, Taipeh International Convention Centre, 1992.
3. TRAVELLI, A., "Status and Progress of the RERTR Program in the Year 2000", Presented at the 2000 International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactor", Las Vegas, 2000.
4. LIEM, P.H., ARBIE, B., SEMBIRING, T.M., PRAYOTO, and NABBI, R., "Fuel Management Strategy for the New Equilibrium Silicide Core Design of RSG-GAS (MPR-30)", Journal of Nuclear Engineering Design, Vol. 180, 1998, pp.207-219.
5. ARBIE, B., NABBI, R., PRAYOTO, and SEMBIRING, T.M., "Conversion Study from Oxide to Silicide Fuel for Indonesian 30 MW Multi Purpose Reactor G.A. Siwabessy", The 18th International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactor, Paris, 1995.
6. NUREG - 1313, "Safety Evaluation Report Related to the Evaluation of Low-Enriched Uranium Silicide - Aluminium Dispersion Fuel for Use in Non-Power Reactors", U.S. Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Reactor Regulation, 1988.
7. ENDIAH, P.H., "Analisis Keselamatan Teras Konversi RSG-GAS pada Sistem Pendinginan Konveksi Paksa dan Konveksi Bebas", Prosiding Presentasi Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir VI, Jakarta, 2001.
8. TUKIRAN, S., dan IMAN, K., "Peningkatan Batas Maksimum Fraksi Bakar Buang Bahan Bakar Silisida Reaktor RSG-GAS", Prosiding Presentasi Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir VI, Jakarta, 2001.
9. HOFMAN, G.L., and SNELGROVE, J.L., "Dispersion Fuels", Vol. 10A, Nuclear Materials, Part 1, edited by B.R.T. FROST, VCH Verlagsgesellschaft mbH, D-69451, Weinheim, Germany.
10. REST, J., "The DART Dispersion Analysis Research Tool: A Mechanistic Model for Predicting Fission-Product-Induced Swelling of Aluminum Dispersion Fuels", ANL-95/36, Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois, 1995.
11. HOFMAN, G.L., REST, J., and SNELGROVE, J.L., "Irradiation Behavior of Uranium Oxide - Aluminum Dispersion Fuel", Presented at the 1996 International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors, Seoul, 1996.
12. HOFMAN, G.L., COPELAND, G.L., and SANECKI, J.E., "Microscopic Investigation into the Irradiation Behaviour of U₃O₈-Al Dispersion Fuel", Nuclear Technology, Vol. 72, 1986, pp.328-334.
13. REST, J., and HOFMAN, G.L., "Dynamics of Irradiation-Induced Grain Subdivision and Swelling in U₃Si₂ and UO₂ Fuels", Journal of Nuclear Materials, Vol. 210, 1994, pp.187-202.
14. REST, J., HOFMAN, G.L., DART, "Model for Irradiation-Induced Swelling of Uranium Silicide Dispersion Fuel Elements", Nuclear Technology, Vol. 126, 1999, pp.88-101.
15. COPELAND, G.L., HOBBS, R.W., HOFMAN, G.L., and SNELGROVE, J.L., "Performance of Low-Enriched U₃Si₂ - Aluminum Dispersion Fuel Elements in the Oak Ridge Research Reactor", ANL/RERTR/TM-10, Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois, 1987.

-
16. SNELGROVE, J.L., DOMAGALA, R.F., HOFMAN, G.L., and WIENCEK, T.C., “The Use of U_3Si_2 Dispersed in Aluminum in Plate-Type Fuel Elements for Research and Test Reactors”, ANL/RERTR/TM-11, Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois, 1987.
 17. HOFMAN, G.L., “A General Evaluation of the Irradiation Behavior of Dispersion Fuels”, Proceeding of the XIV International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactor, Badan Tenaga Atom Nasional, Jakarta, 1991.
 18. HOFMAN, G.L., and Ryu, W.S., “Detailed Analysis of Uranium Silicide Dispersion Fuel Swelling”, Presented at the meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors, Berlin, 1989.