

PERMASALAHAN FABRIKASI BAHAN BAKAR U_3Si_2 -Al DENGAN TINGKAT MUAT URANIUM TINGGI

Supardjo
Pusat Elemen Bakar Nuklir

ABSTRAK

PERMASALAHAN FABRIKASI BAHAN BAKAR U_3Si_2 -Al DENGAN TINGKAT MUAT URANIUM TINGGI. Kualitas produk elemen bakar dispersi U_3Si_2 -Al merupakan tujuan utama bagi setiap fabrikator. Elemen bakar tingkat muat uranium rendah mudah difabrikasi, tetapi dengan kenaikan tingkat muat uranium, homogenitas distribusi uranium sulit dicapai dan di dalam pelat elemen bakar selalu terbentuk *white spots*, *blister*, dan *dogboning*. Beberapa kendala tersebut kemungkinan dapat dieliminasi dengan menaikkan tekanan pengepresan inti elemen bakar, ketelitian penyiapan paket rol, melapisi permukaan inti elemen bakar dengan serbuk Al, dan perlakuan panas terhadap serbuk bahan bakar/Al. Pemilihan diameter partikel bahan bakar/Al secara tepat sangat diperlukan untuk mempermudah proses homogenisasi dan mengatur porositas di dalam pelat elemen bakar. Kenaikan tingkat muat uranium pada tebal *meat* tetap, akan menaikkan kekerasan *meat*, sehingga untuk menghindari terjadinya *dogboning* perlu digunakan bahan kelongsong yang lebih keras.

ABSTRACT

THE FABRICATION PROBLEM OF U_3Si_2 -Al FUEL WITH URANIUM HIGH LOADING. The quality of U_3Si_2 -Al dispersion fuel product is the main aim for each fabricator. Low loading of uranium fuel element is easily fabricated, but with the increased, uranium loading, homogeneity of uranium distribution is difficult to achieve and it always formed white spots, blister, and dogboning in the fuel plates. The problem can be eliminated by the increasing of core pressing, accurate preparation of the composite, the core surface coating with the Al powder, and the heat treatment of the fuel/Al powder. The precise selection of fuel/Al particles diameter is needed indeed to make easier in the homogeneous process of powder and the porosities arrangement in the fuel plates. The increasing of uranium loading at constant meat thickness will increase the meat hardness, therefore to withdraw the dogboning forming, the use of harder cladding materials is necessity.

PENDAHULUAN

Teknologi fabrikasi elemen bakar reaktor riset tipe pelat yang berisi bahan bakar U_3O_8 dan UAl_x perkayaan tinggi ($\pm 93\%$ U-235) yang di dispersikan ke dalam matriks aluminium telah dikembangkan sejak tahun 1950 an. Fabrikasi kedua jenis elemen bakar perkayaan tinggi cukup berhasil, karena dengan tingkat muat uranium rendah sudah dimungkinkan dicapai fluks neutron yang tinggi.

Berkaitan program perubahan penggunaan bahan bakar reaktor riset dari perkayaan tinggi ke perkayaan rendah ($\pm 20\%$ U-235) pada disain volume teras reaktor tetap, maka untuk mengompensasi penurunan jumlah U-235 perlu dipilih bahan bakar yang memiliki densitas tinggi.

Langkah awal mempertinggi tingkat muat uranium telah diterapkan pada bahan bakar U_3O_8 dan UAl_x , tetapi kedua bahan bakar tersebut hanya mampu menaikkan tingkat muat uranium masing-masing dari 2,00 menjadi 3,20 g/cm^3 dan 1,00 menjadi 2,40 g/cm^3 . Unjuk kerja kedua bahan bakar tersebut cukup baik tetapi belum mampu mengompensasi penurunan jumlah U-235 yang hampir 4,5 kali lipat lebih rendah. Beberapa

paduan uranium yang telah diteliti ternyata hanya paduan uranium silisida, U_3Si_2 yang cukup memenuhi kriteria bahan bakar nuklir, dengan keunggulan antara lain: densitasnya tinggi (12,20 g/cm^3), stabil terhadap iradiasi, dan fabrikasinya relatif mudah dengan resiko kegagalan rendah. Dengan menggunakan bahan bakar U_3Si_2 tingkat muat uranium bahan bakar dapat ditingkatkan hingga 5,20 g/cm^3 . Kendala umum yang muncul pada fabrikasi bahan bakar tipe pelat dengan kenaikan tingkat muat uranium adalah kegagalan produksi meningkat, oleh karena itu pemilihan bahan dan parameter fabrikasi secara tepat sangat diperlukan guna mengeliminasi kendala tersebut.

FABRIKASI PEB U_3Si_2 -Al

Elemen bakar dispersi tipe pelat yang berisi U_3Si_2 -Al difabrikasi melalui dua tahap pengerjaan yaitu:

1. Pembuatan paduan dan serbuk U_3Si_2 , dan
2. Pembuatan IEB, PEB, dan perakitan EB.

Secara garis besar proses fabrikasi dapat ditampilkan dalam bentuk diagram alir pada Gambar 1, dan diuraikan sbb.

Pembuatan Paduan dan Serbuk U_3Si_2

Paduan U_3Si_2 dibuat dengan peleburan menggunakan tungku busur listrik bermedia gas iner. Peleburan dilakukan beberapa kali untuk mendapatkan paduan yang homogen. Paduan U_3Si_2 adalah rapuh sehingga mudah dibuat serbuk sesuai ukuran butir yang dikehendaki.

Pembuatan IEB, PEB dan Perakitan EB

Fabrikasi PEB U_3Si_2 -Al dengan teknik *Picture and frame*, menggunakan kelongsong paduan aluminium. Langkah pertama, serbuk U_3Si_2 dan Al dicampur dengan perbandingan tertentu sesuai dengan tingkat muat uranium yang diinginkan, kemudian dihomogenisasi dan akhirnya dipres pada tekanan tinggi sehingga terbentuk IEB. Uap air dan pelumas (Natrium Stearat) yang terikat pada IEB dihilangkan dengan perlakuan panas dalam kondisi vakum. Paket rol dibuat dengan cara, IEB yang telah bebas dari uap air/pelumas, dimasukkan kedalam pelat rangka dan dua pelat tutup, kemudian pada keempat sisi sambungannya dilas TIG di beberapa titik. Paket rol kemudian dikenai perolan panas beberapa tahap hingga diperoleh tebal pelat sesuai yang diinginkan. Suhu perolan panas berkisar antara 425° s.d 500 °C, tergantung paduan Al yang digunakan sebagai kelongsong. Pelat elemen bakar hasil perolan dikenai pengujian secara merusak dan tidak merusak.

BAHASAN

Keberhasilan fabrikasi bahan bakar dispersi tipe *Materials Testing Reaktor*(MTR) yang berisi bahan bakar silisida tingkat muat uranium tinggi sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain, diameter partikel serbuk U_3Si_2 dan Al, bentuk inti elemen bakar(IEB), penyiapan paket rol serta kondisi perolan panas dan perolan dingin. Faktor-faktor tersebut secara garis besar dapat diuraikan sbb:

Penyiapan Serbuk U_3Si_2 dan Serbuk Al

Paduan U_3Si_2 adalah piroporik, maka pada pengerjaannya harus dilakukan di dalam media gas iner. Teknik peleburan menggunakan tungku busur listrik berelektrode wolfram merupakan salah satu metode yang tepat untuk pembuatan ingot U_3Si_2 . Metode ini mudah dilakukan dan ingot yang dihasilkan cukup memenuhi kualitas bahan bakar, karena elektrode wolfram tidak memberikan efek negatif yang dapat menurunkan kualitas. Homogenitas ingot dapat dicapai dengan pengulangan peleburan. Pada suhu kamar U_3Si_2

dapat bereaksi dengan oksigen di dalam udara, dan reaksi akan bertambah cepat pada suhu $\geq 177^\circ C$. Oleh karena itu setiap selesai peleburan, ingot dibalik dengan hati-hati, dan tidak boleh dengan penekanan yang terlalu kuat karena sangat mudah memercikkan bunga api yang pada akhirnya akan menurunkan kualitas ingot.

Serbuk aluminium memiliki daya serap terhadap uap air cukup tinggi, sehingga pengerjaannya juga harus dilakukan di dalam media gas iner. Adanya uap air yang masih terdapat di dalamnya harus dihilangkan, karena akan mengganggu homogenitas dan dapat menyebabkan terbentuknya lepuhan (*blisters*) pada pelat elemen bakar setelah perolan panas berlangsung. Oleh karena itu sebelum pengerjaan lebih lanjut serbuk U_3Si_2 dan serbuk Al perlu dikenai perlakuan panas.

Bahan bakar dispersi dikatakan ideal apabila butiran bahan bakar terdistribusi merata di dalam *meat*, sehingga setiap butiran bahan bakar dikelilingi oleh aluminium matriks. Pada kenyataannya kondisi ideal sulit dicapai karena sangat pengaruhi terutama oleh ukuran butir, dan tingkat muat uraniumnya. Makin tinggi tingkat muat uranium sulit dihomogenisasi karena perbedaan berat jenis antara U_3Si_2 ($12,20 \text{ g/cm}^3$) dan aluminium ($2,70 \text{ g/cm}^3$) cukup jauh, sehingga sangat mudah terjadi aglomerasi. Hal yang sama akan terjadi apabila fraksi halus ($\sim 44 \mu\text{m}$) cukup tinggi. Akibat kenaikan volum dispersan dan atau fraksi halus akan menaikkan porositas di dalam *meat* dan pada akhirnya memungkinkan terbentuknya *white spots* di dalam PEB. Untuk mengeliminasi ketidak homogenan perlu dipilih ukuran butir yang tepat dengan penanganan yang hati-hati termasuk pada saat pemindahan bahan dan pengepresan.

Inti Elemen Bakar (*core*)

Inti elemen bakar merupakan bahan utama di dalam elemen bakar, dibuat menggunakan cara pengepresan terhadap campuran homogen antara serbuk U_3Si_2 dan matriks Al, dengan perbandingan sesuai dengan tingkat muat uraniumnya seperti contoh Tabel 1. Pengepresan campuran serbuk U_3Si_2 dan Al pada tekanan yang sama terhadap tingkat muat yang berbeda akan diperoleh ketebalan IEB yang berbeda pula. Makin tinggi tingkat muat uranium, IEB hasil pengepresan semakin tebal^{4,5}.

Inti elemen bakar disusun dalam bentuk paket rol dan dilas beberapa titik pada keempat sisinya (contoh Gambar 2.), atau dalam bentuk U

(tapal kuda). Pelasan ini berfungsi untuk menjaga agar tidak terjadi pergeseran pelat, dan menghindari terjebaknya udara/gas di dalam PEB saat perolan panas berlangsung.

Suhu perolan panas sangat tergantung pada jenis bahan kelongsong yang digunakan. Perbedaan bahan dan suhu perolan akan berdampak pada karakteristik produk. Bahan kelongsong paduan aluminium seperti AlMg1, AlMg2, Al 6061 telah banyak digunakan, dengan suhu perolan berkisar antara 425 s.d 500°C. Sebagai contoh perolan panas PEB dengan kelongsong pelat AlMg2 yang dilakukan pada suhu 425°C diperoleh pelat cukup baik.

Tabel 1. Komposisi U₃Si₂ dan Al dengan Tingkat Muat Uranium antara 3,60 s.d. 5,20 g/cm³

tingkat muat U (g/cm ³)	Vol. U ₃ Si ₂ (%)	VOL. Al (%)
3,00	26,66075	73,33925
3,50	30,88086	69,11914
4,00	35,10098	64,89902
4,50	39,32111	60,67889
5,00	43,54123	56,45877
5,50	47,76135	52,23865
6,00	51,98148	48,01852

Porositas

Prosentase porositas yang terbentuk di dalam PEB sangat ditentukan oleh parameter antara lain, ukuran dan kekerasan butir bahan bakar, kekuatan matriks, suhu perolan, tebal akhir *meat* dan fraksi volum bahan bakar.

Selama proses pengepresan IEB dan perolan panas PEB, butiran bahan bakar/matriks bergerak dan tersusun kembali dengan tanpa mengalami deformasi/rusak atau sebaliknya. Perpindahan butiran terbesar terjadi pada proses pengepresan dan perolan panas tahap pertama. Kerapuhan senyawa U₃Si₂ mengakibatkan butiran mudah pecah pada saat proses perolan berlangsung (contoh Gambar 3.), sehingga fraksi halus di dalam *meat* akan lebih banyak dibanding di dalam IEB. Fraksi halus di dalam *meat* akan bertambah dengan kenaikan fraksi volum bahan bakar. Kenaikan fraksi halus bahan bakar akan memperluas permukaan kontak partikel bahan bakar yang dapat memperlambat aliran matriks, dan pada akhirnya berdampak pada kenaikan porositas. Hal ini mungkin terdapat korelasi antara fraksi halus butiran bahan bakar (-44µm) dan porositas di dalam *meat*. Selain beberapa kemungkinan tersebut diatas penggunaan bahan

bakar dengan butiran yang terlalu halus akan memungkinkan terbentuknya *white spots* pada PEB. Ukuran butiran serbuk dan tingkat muat uranium mempengaruhi jarak antar butir serbuk bahan bakar. Jarak antar butir bahan bakar = 0 apabila fraksi volum bahan bakar di dalam *meat* sebesar 74 %⁸. Pada kondisi tersebut butiran bahan bakar akan bersinggungan. Secara umum fraksi volum bahan bakar dispersi maksimum di dalam matriks Al yang masih dapat difabrikasi adalah berkisar antara 45 s.d. 50 %¹. Berdasar pengalaman beberapa fabrikator/lembaga penelitian menyebutkan bahwa untuk fabrikasi bahan bakar U₃O₈ jumlah butiran halus (-44µm) harus ≤ 25%, sedang fabrikasi bahan bakar U₃Si₂ butiran halus disarankan ≤ 15%. Fraksi halus (-44 µm) butiran bahan bakar U₃Si₂ dinaikkan dari 0 s.d 25%, terjadi kenaikan porositas seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Perubahan prosentase porositas akibat perubahan fraksi volum bahan bakar U₃Si₂ lebih rendah dibanding U₃Si, ini kemungkinan disebabkan oleh kerapuhannya. Kenaikan fraksi volum bahan bakar akan diikuti kenaikan porositas seperti ditunjukkan pada Gambar 5.

Ketebalan *meat* bahan bakar juga berpengaruh terhadap besarnya porositas. Apabila tebal *meat* diturunkan (pada fraksi volum bahan bakar tetap), maka porositas naik dengan perubahan antara 1-2%. Apabila *meat* lebih tebal, kemungkinan aliran matriks lebih cepat dan mengisi bagian rongga yang menyebabkan porositas menurun.

Perolan dingin akan menaikkan porositas, hal ini kemungkinan kekuatan matriks pada suhu kamar meningkat⁷. Pada perolan tahap pertama, porositas pelat bagian depan lebih rendah daripada pelat bagian belakang. Ini kemungkinan disebabkan oleh pendinginan pelat atau udara yang terjebak di dalam PEB bagian belakang lebih banyak selama perolan tahap pertama. Kenaikan porositas akan menurunkan konduktivitas, seperti ditampikan pada Gambar 6.

Lepuhan (*blisters*)

Selama penyiapan campuran serbuk U₃Si₂ dan Al, pengepresan IEB, dan penyiapan paket rol kemungkinan terjadi penyerapan uap air oleh serbuk Al. Pada perolan panas, uap air itu akan cepat bereaksi dengan U₃Si₂ di dalam *meat* dan membentuk gas hidrogen. Gas hidrogen hasil reaksi terdifusi keluar dari zona bahan bakar membentuk blister di dalam kelongsong seperti ditunjukkan pada Gambar 7². Adanya blister

akan mengurangi kesempurnaan ikatan, sehingga mengurangi kekuatan kelongsong. Apabila hal ini terjadi maka akan berbahaya selama di iradiasi di dalam reaktor, karena kemungkinan *blister* akan terisi oleh gas fisil yang dapat menyebabkan kebocoran, terlebih pada *burn-up* tinggi.

Untuk mengeliminasi terbentuknya *blister* dari gas hidrogen, dapat dilakukan dengan memanaskan IEB/paket rol pada suhu 480°C, tekanan $\geq 10^{-4}$ torr selama 6 jam. Setelah didinginkan hingga suhu 30°C, tungku diisi gas argon dan selanjutnya IEB/paket rol dipindahkan untuk pengerjaan lebih lanjut. Perlakuan panas ini akan mengusir uap air yang berada di dalam IEB/paket rol yang terabsorpsi oleh serbuk Al selama pemindahan, pengepresan, atau waktu penyusunan paket rol.

Perlakuan panas juga dilakukan setelah proses perolan panas 4 atau 5 x sesuai dengan tahap pengerolannya. Perlakuan panas dapat menekan terbentuknya gas hidrogen dari reaksi uap air dan U_3Si_2 di dalam *meat* untuk berdifusi melalui kelongsong. Dengan perlakuan demikian terbentuknya blister akan dapat dihindari².

Zona bebas bahan bakar pada ujung dan sisi PEB

Pada proses perolan panas kemungkinan terdapat partikel bahan bakar yang terlempar dari zona bahan bakar masuk ke dalam kelongsong. Terlemparnya partikel bahan bakar terutama terjadi pada perolan panas tahap pertama, dan akan lebih banyak apabila fraksi volume bahan bakar dalam IEB dinaikkan. Dengan kenaikan fraksi volume bahan bakar kekuatan IEB menurun dan banyak partikel bahan bakar berada dipermukaan, sehingga pada perolan memungkinkan partikel-partikel tersebut berada dipinggir kelongsong akan berakibat produk fisinya keluar dan masuk ke dalam pendingin reaktor. Untuk mengeliminasi terjadinya loncatan partikel bahan bakar kemungkinan dapat dilakukan dengan menaikkan tekanan pengepresan IEB, peningkatan ketelitian pada pembuatan paket rol, dan melapisi seluruh permukaan IEB dengan serbuk Al. Peningkatan tekanan pengepresan akan meningkatkan kekerasan IEB sehingga pada perolan dapat memperkecil terjadinya pelepasan partikel bahan bakar ke luar dari *meat*, sedangkan ketelitian penyiapan paket rol yang perlu diperhatikan adalah kesesuaian tebal IEB dengan pelat rangka dan kekuatan pelasan. Kekuatan pelapan merupakan keharusan agar selama perolan tidak terjadi pergeseran posisi *meat* dan kelongsong. Pelapisan IEB dengan serbuk Al dimaksudkan untuk menghalangi loncatan serbuk

bahan bakar selama perolan berlangsung. dengan pelapisan ini akan menaikkan porositas, untuk itu tebal lapisan harus dibuat seoptimal mungkin.

Tebal *Meat* dan Kelongsong

Penentuan tebal kelongsong dan *meat* secara tepat sepanjang pelat elemen bakar sangat sulit dilakukan karena pada kenyataannya batas antara *meat* dan kelongsong tidak merupakan garis lurus melainkan nampak seperti pada Gambar 8. Penentuan tebal kelongsong dan *meat* biasa dilakukan dengan cara metalografi terhadap irisan pelat elemen bakar yang diambil secara acak. Irisan PEB diamati dengan mikroskop optik yang dilengkapi fasilitas pengukur dimensi. Hasil pengukuran ini dianggap telah mewakili sejumlah produk PEB. Apabila tebal kelongsong yang diuji memenuhi persyaratan, maka PEB lainnya dianggap memenuhi persyaratan pula.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan kenaikan tingkat muat uranium (untuk tebal PEB dan kondisi pengepresan tetap), maka *meat* bertambah tebal, sedang kelongsong semakin tipis seperti ditunjukkan pada Tabel 2. Apabila diinginkan kenaikan fraksi volum bahan bakar pada tebal *meat* dan kelongsong tetap, maka tekanan perolan harus dinaikkan, dan untuk itu perlu diimbangi penggunaan bahan kelongsong yang lebih keras.

Tabel 2. Tebal Kelongsong dan Meat Bahan Bakar U_3Si_2 -Al Tingkat Muat Uranium antara 3,60 s.d 5,20 g/cm³

Tingkat muat U (g/cm ³)	Tebal kelongsong (mm)	Tebal <i>meat</i> (mm)
3,60	0,413	0,588
4,20	0,393	0,629
4,80	0,401	0,635
5,20	0,366	0,674

Dogboning

Dogboning adalah pengumpulan uranium di ujung PEB yang terbentuk pada proses perolan panas, apabila *meat* lebih keras daripada kelongsong. Pada proses perolan tersebut akan terjadi pengelompokan/penebalan bahan bakar di ujung PEB karena serbuk Al yang berfungsi sebagai penghambat laju alir bahan bakar makin sedikit. Pengelompokan ini akan terbentuk yang pada akhirnya kelongsong menjadi tipis dan kadang-kadang hingga dibawah batas minimum tebal kelongsong yang diizinkan. Fabrikasi PEB

U_3Si_2-Al dengan tingkat muat uranium $1,30 \text{ g/cm}^3$ sangat mudah dilakukan, tidak terbentuk *dogbone*, dan didistribusi bahan bakar sepanjang pelat hasil rekaman uji Radiografi Sinar-X cukup homogen seperti ditunjukkan pada Gambar 8a. Dengan kenaikan tingkat muat, jarak antar butir semakin rapat dengan distribusi uranium cukup homogen, dan pada tingkat muat uranium $5,30 \text{ g/cm}^3$ mulai ada kecenderungan terbentuk *dogboning* walaupun masih dalam batas yang diizinkan seperti Gambar 8c. Terbentuknya *dogboning* pada PEB tidak diinginkan karena selain berpengaruh pada ketebalan kelongsong juga adanya pengumpulan bahan bakar disuatu titik, sehingga selama iradiasi memungkinkan terjadinya *local heat* yang sangat membahayakan. Untuk mengeliminasi terbentuknya *dogboning* dapat dilakukan dengan menggunakan kelongsong paduan Al yang lebih keras, atau ujung-ujung PEB dibuat tirus. Tirus ini berfungsi untuk menampung bahan bakar yang terdorong selama perolan berlangsung, agar tidak keluar dari zona bahan bakar.

SIMPULAN

Fabrikasi elemen bakar tipe pelat yang berisi bahan bakar silisida tingkat muat uranium rendah ($\leq 3,6 \text{ g/cm}^3$), mudah dilakukan dengan produk yang cukup baik, akan tetapi makin tinggi tingkat muat uranium fabrikasinya semakin sulit terutama untuk mendapatkan distribusi uranium di dalam *meat* yang homogen, menghindari terbentuknya *blister*, *white spots*, dan *dogboning* pada ujung PEB. Untuk itu beberapa parameter harus diperhatikan terutama pemilihan bahan kelongsong dan distribusi diameter butir dan perlakuannya, penyiapan IEB dan paket rol serta kondisi perolannya.

DAFTAR PUSTAKA

1. Hofman, G.I., and Snelgrove, J.L., *Dispersion Fuels*, Chapter 2
2. Snelgrove, J.L., *Development, Testing, and Demonstration of LEU Fuel*, Part 1., IAEA Mission to Indonesia, October, 1988.
3. Toft, P., et al., *Pilot Plant Production at Rico of LEU Silicide Fuel For The Danish Reactor DR3*, Metallurgy Department, Rico National Laboratory DK-4000 Roskilde, Denmark, December, 1986.
4. Winckel, T.C., *A Study of The Effect of Fabrication Variables on The Quality of Fuel Plates*, RERTR, ANL, November 3-6, 1986
5. Supardjo, dkk., *Pengaruh Tingkat Muat uranium Terhadap Produk elemen Bakar U_3Si_2-Al* , presentasi ilmiah, PPNY, April, 1995

6. Report of consultants Group Meeting *Standardization of specifications and Inspection Procedures for LEU Plate-Type Research Reactor Fuels*, IAEA and held in Geesthacht, 16-18, April, 1986.
7. Martin, M., *Effect of Dispersoid Concentration on Void Content of Composite Plate*, ORNL-4770, 1968.
8. Samoilov, A.G., et al., *Dispersion Fuel Nuclear Reactor Element*, atomizdat, Moskva, 1965
9. Fanjas, Y. et al., *Cerca Contribution To The RERTR Program Status of Development*, September, 1983.
10. *Safety evaluation report*, US Nuclear Regulatory Commission, July, 1988.

TANYA JAWAB

1. Amil Mardha

- Pembuatan elemen bakar dengan tingkat muat yang tinggi; apakah anda sudah menganalisis nilai fraksi bakar (BU) dan densitasnya.

Supardjo

- Analisis fraksi bakar (BU) belum dilakukan, tetapi densitas pelat elemen bakar (PEB) dengan tingkat muat $5,2 \text{ gU/cm}^3$ sudah dilakukan pengurusan.

2. Endiah Puji Hastuti

- mengingat kesulitan dalam proses fabrikasi U_3Si_2-Al dengan tingkat muat tinggi ($5,2 \text{ gU/cm}^3$), demikian pula dengan fabrikasi jumlah pelat yang lebih besar dan 21 pelat per elemen bakar serta mengingat ikatan antar pelat menjadi semakin sempit, maka untuk tujuan menaikkan reaktivitas teras RSG, langkah apa yang mungkin dilakukan dengan kenaikan tingkat muat uranium ini dan batasan-batasan fabrikasi tersebut ?

Supardjo

- Untuk menaikkan reaktivitas teras reaktor adalah dengan menaikkan pemuatan bahan bakar uranium. Batasan fabrikasi : disain bahan bakar, seperti dimensi bahan bakar RSG-GAS.

3. Agoeng Kadardjono

- Dalam pengujian porositas dan konduktivitas IEB/PEB hasilnya pada literatur/teori yang ada (kalau tidak salah), apakah tidak sebaiknya diteliti sendiri dengan peralatan yang kita miliki, sehingga diharapkan hasilnya justru memperkuat literatur/teori yang ada.

Supardjo

- Sebetulnya porositas sudah diteliti, dan hasilnya mendekati data literatur, sedang penelitian konduktivitas belum dilakukan sehingga mengacu literatur.

4. B.G. Susanto

- Belum dijelaskan berapa % distribusi partikel dari U_3Si_2 untuk meningkatkan tingkat muat > 5,2 gU/cm³, mohon dijelaskan.

Supardjo

- Berdasarkan pengalaman Argonne National Laboratory (ANL), untuk seluruh tingkat muat uranium di dalam bahan bakar U_3Si_2-Al , fraksi

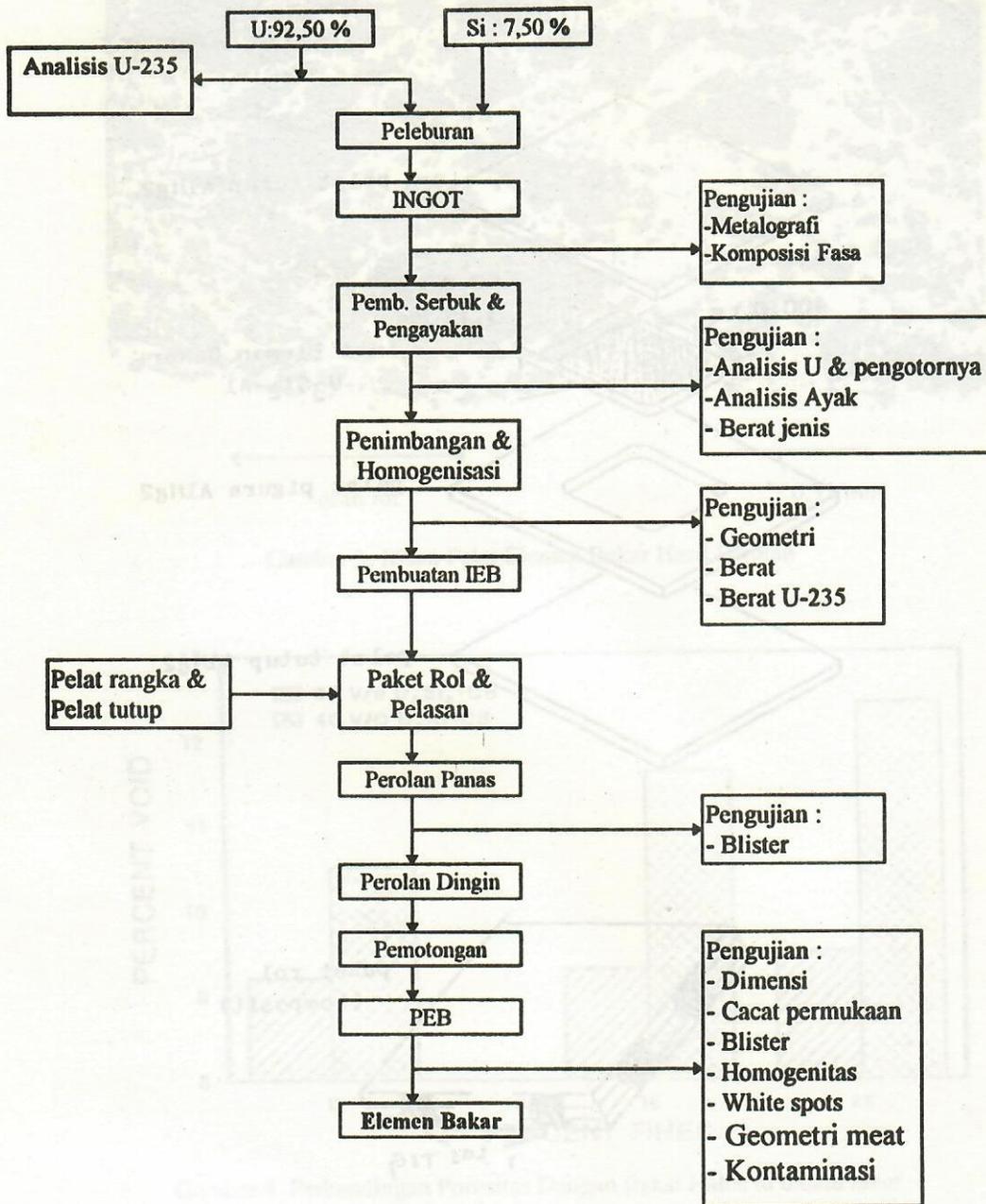
halus partikel BB U_3Si_2 berkisar antara 0-15 % (-325 mesh = 15 % dan +325 mesh serta 0-100 mesh = 85 %)

5. Veronika

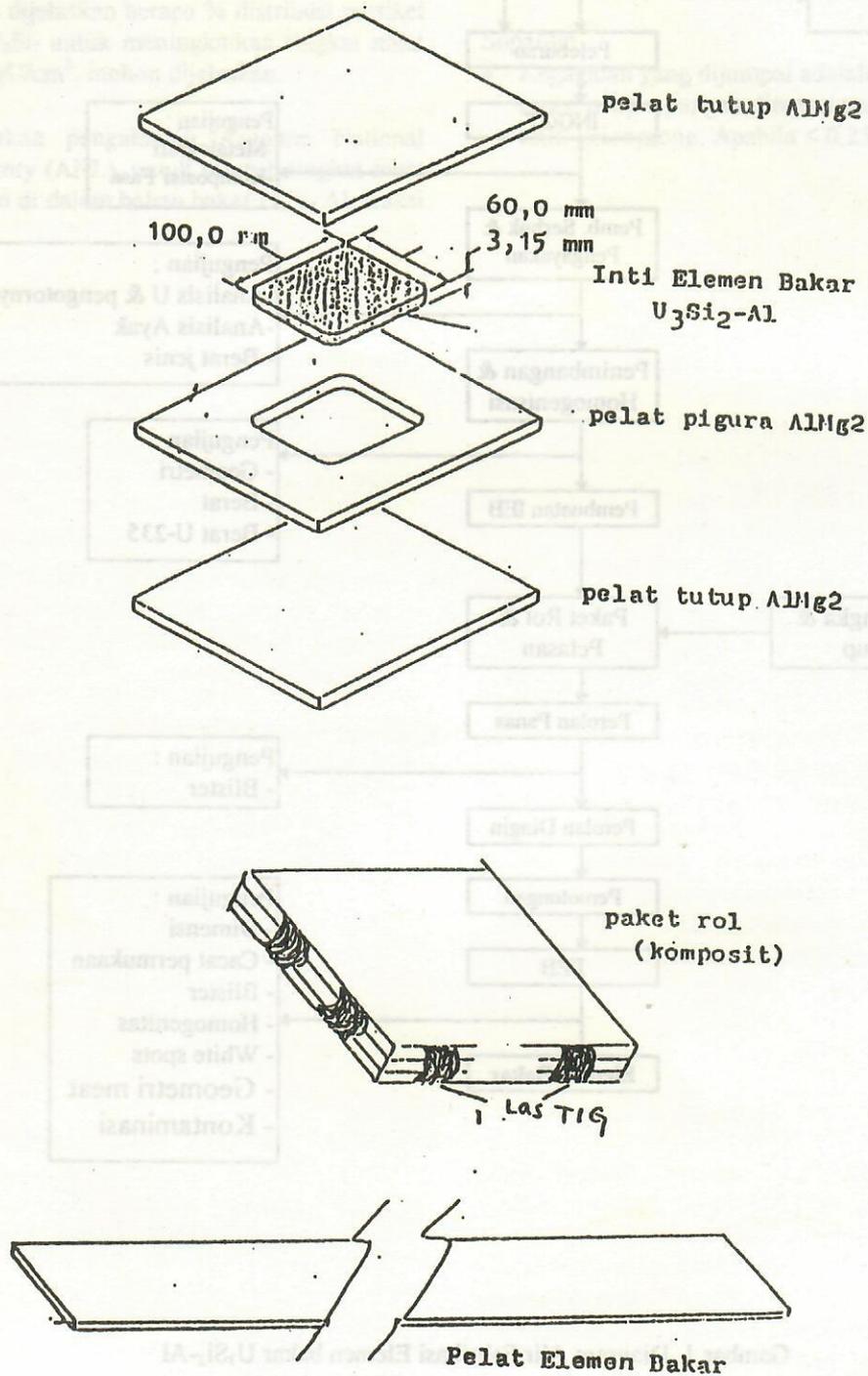
- Kegagalan-kegagalan apa saja yang dijumpai dalam fabrikasi elemen bakar U_3Si_2-Al ?

Supardjo

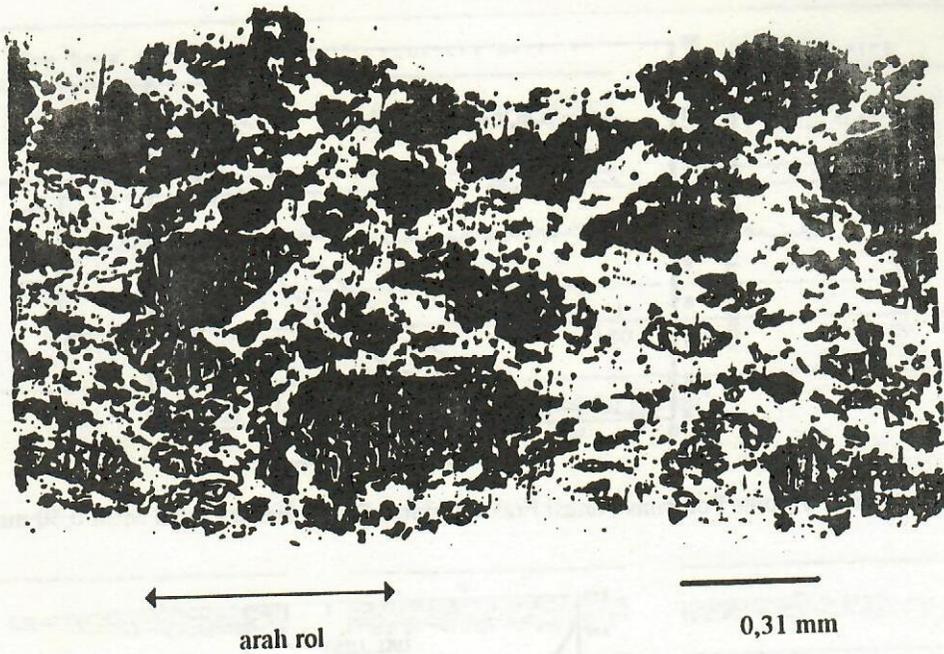
- Kegagalan yang dijumpai adalah blister, white spots, penyimpangan dimensi zona BB dan tebal kelongsong. Apabila < 0,25 mm.



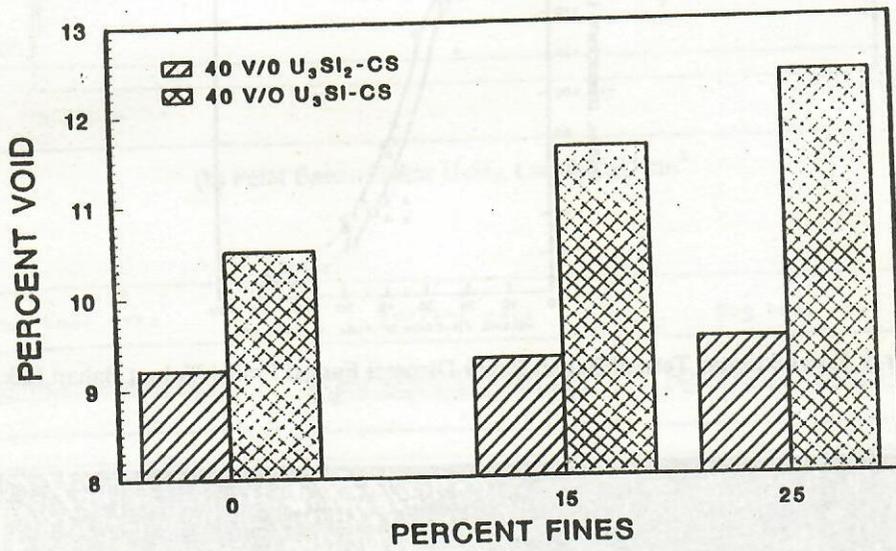
Gambar 1. Diagram Alir Fabrikasi Elemen bakar U₃Si₂-Al



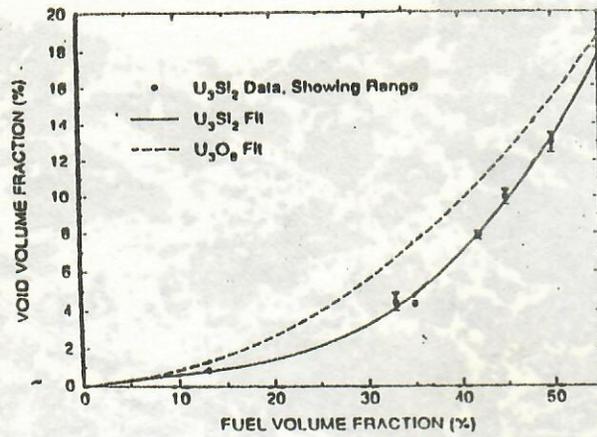
Gambar 2. Susunan Paket Rol



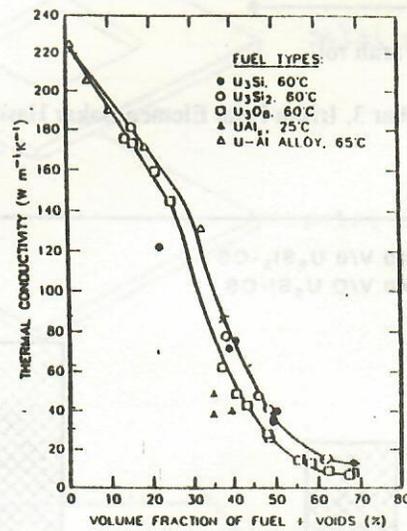
Gambar 3. Irisan Pelat Elemen Bakar Hasil Perolan



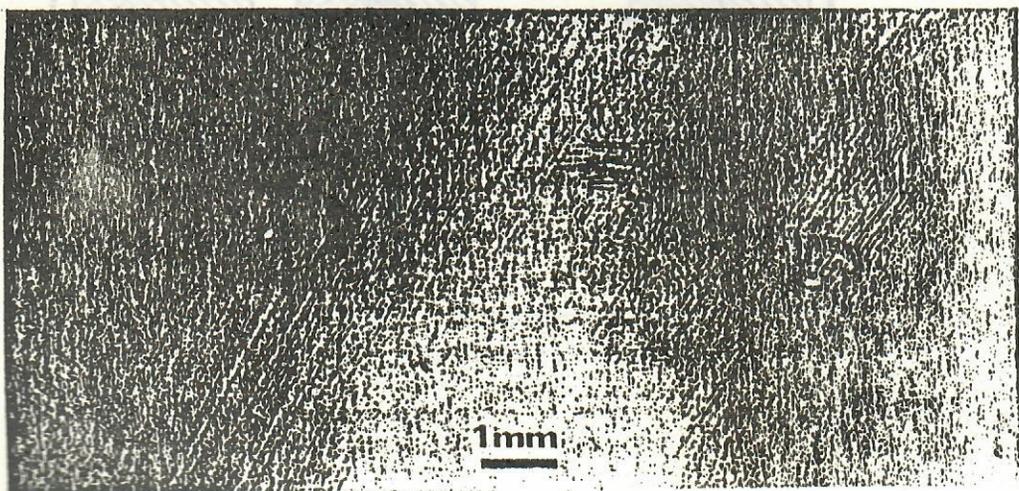
Gambar 4. Perbandingan Porositas Dengan fraksi Halus di dalam meat



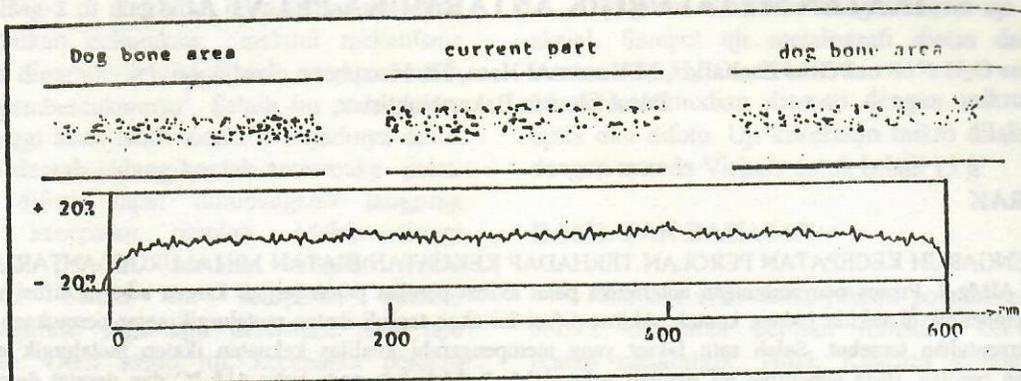
Gambar 5. Volume Porositas Fungsi Fraksi Volume Bahan Bakar (Tebal Meat 0,50 mm)



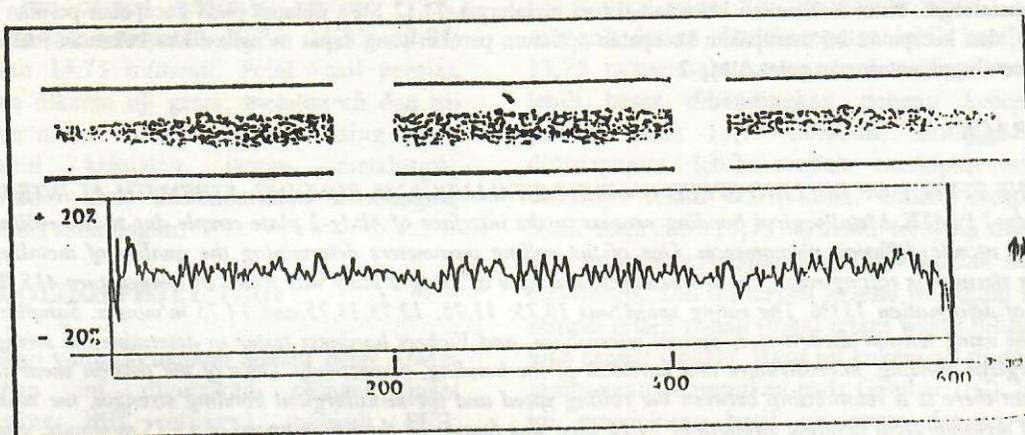
Gambar 6. Konduktivitas Termal Bahan Bakar Dispersi Fungsi Fraksi Volum Bahan Bakar + Pori



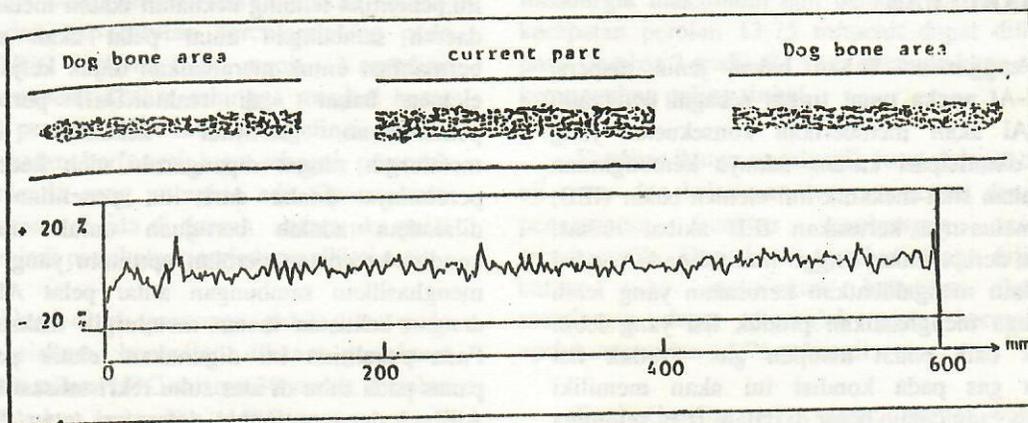
Gambar 7. Blister di Dalam Pelat Elemen Bakar U₃Si₂-Al di Luar Meat



(a) Pelat Bahan Bakar U_3Si_2 t.m. $1,30 \text{ gU/cm}^3$



(b) Pelat Bahan Bakar U_3Si_2 t.m. $5,0 \text{ gU/cm}^3$



(c) Pelat Bahan Bakar U_3Si_2 t.m. $5,30 \text{ gU/cm}^3$

Gambar 8. Pelat Elemen Bakar U_3Si_2 -Al, Tebal Meat 0,50 mm