

**PROSPEK BAHAN BAKAR URANIUM SILISIDA DENGAN Si-
HIPOSTOIKIOMETRIK (KADAR Si \leq 3,7 %)**



Asmedi Suropto, Sardjono, Martoyo
Pusat Elemen Bakar Nuklir

ID0100059

ABSTRAK

Upaya untuk mendapatkan tingkat-muat tinggi dengan bahan bakar uranium silisida U_3Si_2 dengan teknologi fabrikasi yang telah dikuasai saat ini hanya akan mampu mencapai tingkat-muat sedikit diatas 5 gU/cm^3 . Perolehan tingkat-muat di atas aras itu tidak dimungkinkan oleh adanya keterbatasan fabrikabilitas. Untuk menanggulangi barrier fabrikabilitas itu difikirkan penggunaan bahan bakar dengan basis uranium silisida U_3Si_2 saja. Kelebihan U ini diperoleh dengan mensintesis U_3Si_2 pada keadaan Si-hipostoikiometrik, tanpa menerapkan *heat treatment* terhadap *ingot* yang diketahui akan dapat menimbulkan U_3Si yang tidak dikehendaki. Kelebihan U diharapkan akan bereaksi dengan matriks Al membentuk senyawa UAl_x yang keberadaannya dapat diterima. Eksperimen untuk menjajagi kemungkinan menyiapkan dan menggunakan campuran bahan bakar itu telah dilakukan dengan melakukan sintesis campuran U_3Si_2 -U pada komposisi kadar Si 3,7 % berat dan 3 % berat. *Ingot* dapat diperoleh dan dijadikan serbuk dengan cukup berhasil dan kemudian difabrikasi menjadi pelat elemen bakar eksperimental untuk diamati derajat interaksi antara U bebas dan matriks Al selama pengerjaan panas yang berlangsung selama perolan pelat elemen bakar. Penelitian masih akan diteruskan untuk tahapan-tahapan lebih lanjut.

ABSTRACT

An attempt to obtain high uranium-loading in silicade dispersion fuel element using the fabrication technology applicable nowadays can reach Uranium-loading slightly above 5 gU/cm^3 . It is difficult to achieve a higher uranium-loading than that because of fabricability constraints. To overcome those difficulties, the use of uranium silicade U_3Si_2 based is considered. The excess of U is obtained by synthesizing U_3Si_2 in Si-hypostoichiometric stage, without applying heat treatment to the ingot as it can generate undesired U_3Si . The U will react with the matrix to form UAl_x compound, that its pressure is tolerable. This experiment is to consider possibilities of employing the U_3Si_2 as nuclear fuel element which have been performed by synthesizing U_3Si_2 -U with the composition of 3.7 % weight and 3 % weight U. The ingot was obtained and converted into powder form wich then was fabricated into experimental plate nuclear fuel element. The interaction between free U and Al-matrix during heat-treatment is the rolling phase of the fuel element was observed. The study of the next phase will be conducted later.

PENDAHULUAN

Pencarian bahan bakar untuk reaktor riset stabil selama iradiasi (dengan tingkat *swelling* minimal) telah mengantarkan kepada penggunaan uranium disilisida U_3Si_2 , meninggalkan upaya untuk menggunakan U_3Si yang memiliki densitas lebih tinggi, akan tetapi kinerja selama iradiasi tidak baik¹.

Pada bulan Juli 1988 US-NRC (*US-Nuclear Regulatory Commission*) mengeluarkan pernyataan bahwa, atas dasar riset pengembangan yang menyeluruh, bahan bakar maju U_3Si_2 hingga tingkat muat $4,8 \text{ gU/cm}^3$ terbukti laik digunakan sebagai bahan bakar tipe MTR (tipe pelat dengan bahan bakar dispersi)². Bahan bakar uranium-

disilisida, U_3Si_2 , memiliki keunggulan relatif sebagai berikut.

- a. densitasnya $12,2 \text{ g/cm}^3$, cukup tinggi dibandingkan U_3O_8 maupun UAl_x
- b. stabilitas sangat baik selama iradiasi (tidak membengkak/*swelling* berlebihan)
- c. fabrikasi dan prosesnya relatif mudah.

Di Indonesia, penelitian penggunaan U_3Si_2 sebagai bahan bakar reaktor riset telah dimulai sejak 1988 dengan telah menguasai tahap sintesis bahan bakar U_3Si_2 ³ dan selanjutnya dibuktikan pula berhasil mencapai kemampuan berproduksi bahan bakar dalam jumlah lebih besar dan menyiapkan prototipe elemen bakar berisi dispersi U_3Si_2 -Al dengan tingkat muat 3.0 gU/cm^3

(setingkat-muat dengan yang digunakan di RSG-GAS dalam bentuk elemen bakar U_3O_8 -Al) untuk uji iradiasi, dan membuktikan bahwa elemen itu berkemampuan tetap stabil selama diiradiasi yang kemudian telah dibuktikan dengan uji pascairradiasi pada tahun 1994.⁴ Menyusul studi produksi bahan bakar dan elemen bakar, studi konversi teras RSG-GAS dari penggunaan bahan bakar uranium oksida U_3O_8 ke penggunaan U_3Si_2 juga sudah mulai dilaksanakan dan akan direalisasikan pada Repelita VI ini, dalam rangka meningkatkan kinerja RSG-GAS pada tingkat-muat U lebih tinggi memanfaatkan densitas U_3Si_2 yang lebih kurang 50 % lebih tinggi dari densitas U_3O_8 .⁵ Selanjutnya, selama Pelita VI pengembangan bahan bakar U_3Si_2 dicanangkan bertarget mendapatkan penguasaan teknologi bahan bakar uranium silisida bertingkat-muat lebih tinggi hingga mencapai sekitar $5,2 \text{ gU/cm}^3$.⁶

Namun penggunaan bahan bakar U_3Si_2 tidak dapat menjawab permintaan tingkat-muat dispersi lebih dari 5 gU/cm^3 (daging), dikarenakan keterbatasan fabrikabilitasnya. Batas serupa menjadi alasan mengapa U_3O_8 yang hanya $8,3 \text{ g/cm}^3$ tidak mungkin memiliki tingkat-muat di atas $3,2 \text{ gU/cm}^3$ (daging). Masyarakat internasional yang telah dan akan menderita kerugian unjuk kerja karena mengubah bahan bakarnya dari kekayaan tinggi >90 % menjadi <20 % masih tetap belum puas dengan penggunaan U_3Si_2 yang tidak dapat mencapai tingkat-muat tinggi.

Untuk menjawab tantangan itu, difikirkan penyiapan bahan bakar baru yang memiliki densitas tinggi dan stabil selama iradiasi, sehingga dalam bentuk dispersi dapat mencapai tingkat-muat tinggi. Semula U_3Si dipilih, tetapi ternyata tidak memiliki sifat iradiasi yang baik. Sekarang sedang dicoba U-nitrida walaupun belum dibuktikan dapat memenuhi syarat sebagai bahan bakar.

Penelitian ini dimaksudkan untuk merintis kegiatan pengembangan ke arah perolehan penguasaan teknologi paduan uranium-silikon yang dapat digunakan sebagai bahan bakar dan memberikan kemungkinan mendapatkan tingkat-muat amat tinggi.

KONSEP BAHAN BAKAR BARU URANIUM SILISIDA

Kandidat bahan bakar diasumsikan akan berasal dari lingkungan famili uranium silisida yang memiliki diagram fasa seperti ditunjukkan

pada Gambar 1. Dhipotesiskan bahwa apabila rasio atomik U/Si dibuat sama atau lebih besar dari pada 3,0 (3 adalah tepat untuk membuat U_3Si), lalu campuran dilebur dan dikenai pendinginan cepat, maka akan terbentuk paduan U_3Si_2 bercampur dengan sisa uranium (yang berlebih) dalam bentuk U bebas.

Sepanjang garis pembentukan fasa U_3Si misalnya, yang dikenal memiliki densitas tinggi¹, yaitu $15,2 \text{ g/cm}^3$, dari daerah leburan (likuidus) hingga terbentuknya beberapa campuran paduan. Apabila pendinginan berjalan cepat sekali, maka tidak sempat terbentuk U_3Si (atau U_3Si yang terbentuk pada pendinginan cepat sangat sedikit), dan sebagai gantinya akan ada U_3Si_2 dan U bebas. Karena pembekuan yang berlangsung cepat, maka U_3Si_2 yang memiliki titik beku lebih tinggi akan membeku terlebih dahulu membentuk dendrit dan berikutnya sisa U akan membeku di rongga-rongga antar dendrit tadi. Mekanisme ini sudah terbukti untuk paduan U_3Si_2 maupun lainnya^{7,8}.

Bila campuran ini dibuat menjadi serbuk dan dianggap sebagai bahan bakar, maka diperkirakan kehadiran uranium bebasnya secara drastis akan meningkatkan densitas campuran yang terbentuk, yang pada gilirannya akan memungkinkan mendapatkan tingkat-muat tinggi. Terbentuknya U_3Si akan sangat kecil mengingat paduan ini terbentuk sangat lambat di bawah suhu peritektoid, yaitu 925°C ¹.

Namun keberhasilan mensintesis paduan uranium-silikon dan menjadikannya serbuk calon bahan bakar masih menghadapi pertanyaan : bagaimana U bebas akan diizinkan dipergunakan sebagai bahan bakar, mengingat sifat iradiasinya sangat buruk. Untuk itu diperlukan studi karakterisasinya untuk mengetahui sifat fisik paduan dan kelakuan/interaksinya dengan bahan lain yang menyusun pelat elemen bakar, terutama dengan aluminium dan U_3Si_2 baik selama dalam proses fabrikasi maupun selama diiradiasi. Dipilihnya campuran bahan bakar ini disertai harapan bahwa U bebas yang terdapat diantara dendrit U_3Si_2 itu akan berinteraksi dengan bahan lain, terutama matriks Al, membentuk paduan UAl_x yang diketahui stabil dalam iradiasi.

Difusi U-Al terbukti berlangsung bahkan hanya di antara dua permukaan logam yang saling dilengketkan dengan tekanan pada pengaruh suhu tertentu. Di dalam sistem dispersi yang diusulkan nanti, bahan bakar campuran akan berbentuk butir yang sebagian besar berukuran puluhan mikrometer ($40\text{-}125\mu$). Dengan demikian, maka bagian dari butir yang memiliki U bebas akan

berkesempatan berkontak langsung dengan matriks Al. Diharapkan dari kontak itu akan terjadi interdifusi yang menghasilkan bahan bakar lebih stabil UAl_x .

PERLENGKAPAN DAN TATAKERJA

Bahan

- uranium terdepleksi (perkayaan 0,25 % - 0,30 %) dalam bentuk logam
- silikon berkemurnian tinggi (derajat semikonduktor)
- bahan untuk pencucian kimia (pikling)
- gas argon
- bahan pengetsa cuplikan ingot dan cuplikan pelat elemen bakar
- bahan pembentuk *mould*
- bahan poles cuplikan metalografi

Peralatan

- Timbangan elektronik
- Tungku lebur vakum dengan busur listrik
- Piranti pikling
- Mesin gerus, mesin ayak, mesin pengering serbuk
- Mesin pres inti elemen bakar
- Peralatan penyiap cuplikan metalografi
- Peralatan Uji : Mikroskop Optik dan Mikroskop Elektron *Scanning*

Tatakerja Percobaan

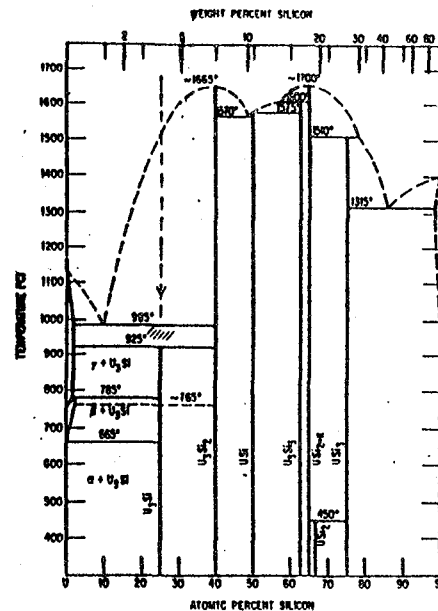
Pembentukan campuran paduan

Logam uranium dan silikon, keduanya dalam bentuk serpih atau potongan kecil dilebur bersama dan berulang-ulang untuk mendapatkan kesempurnaan peleburan, dalam tungku busur listrik vakum dalam lingkungan argon tekanan rendah. Dengan komposisi berat Si antara 3,0 - 3,7 %, maka dari peleburan ini terbentuk campuran paduan uranium silisida dan uranium bebas berupa *ingot* berbentuk cakram.

Penyiapan pelat elemen bakar

Ingot berbentuk cakram itu kemudian digerus menjadi serbuk, lalu dihaluskan dan diayak untuk menghasilkan serbuk distribusi ukuran yang dibutuhkan bagi fabrikasi, yaitu antara 40-125 μ .

Untuk memfabrikasikan serbuk menjadi elemen bakar diikuti proses fabrikasi yang berlaku bagi uranium trioksida. Pertama serbuk bahan



Gambar 1. Diagram fasa sistem paduan U-Si

bakar dicampur dengan serbuk bahan matriks (aluminium) dengan perbandingan tertentu dan dipres menjadi keping cetak inti elemen bakar (IEB). Keping cetak ini berupa cetakan dispersi serbuk bahan bakar dalam serbuk bahan matriks, sehingga bersama-sama mereka sering disebut bahan bakar dispersi. IEB ini kemudian dibungkus secara teknik *picture and frame* dengan tiga lembar bahan kelongsong. Rakitan itu kemudian dirol pada suhu tinggi (sekitar 420° C) beberapa kali hingga memanjang sekaligus menipis membentuk pelat elemen bakar (PEB). Di dalam PEB ini serbuk bahan bakar tetap dalam keadaan dispersi tetapi merata di luasan PEB tersebut.

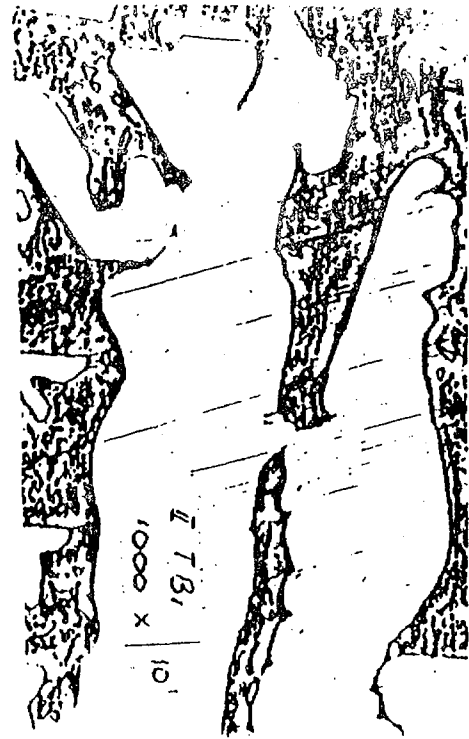
HASIL DAN BAHASAN

Sesuai perencanaan eksperimen, peleburan dilakukan dengan komposisi Si 3,0 % dan 3,7 %. Komposisi 3,7 % sangat dekat dengan komposisi atomik U_3Si , sehingga dengan sendirinya komposisi 3,0 % jauh lebih kaya dengan U bebas. Peleburan berlangsung serupa dengan peleburan U_3Si_2 : logam U pertama melebur dan Si yang bertitik lebur lebih tinggi melarut di dalam leburan logam U.

Ingot yang diperoleh memperlihatkan mikrostruktur seperti terlihat pada Gambar 2a dan 2b dan Gambar 3a dan 3b. Perlu dicatat, bahwa bagian yang berkesempatan bertahan pada suhu tinggi dan bagian yang segera mendingin masing-masing memperlihatkan mikrostruktur yang agak berbeda. Kiranya, struktur dendrit lebih besar terbentuk di bagian yang lebih lama bertahan

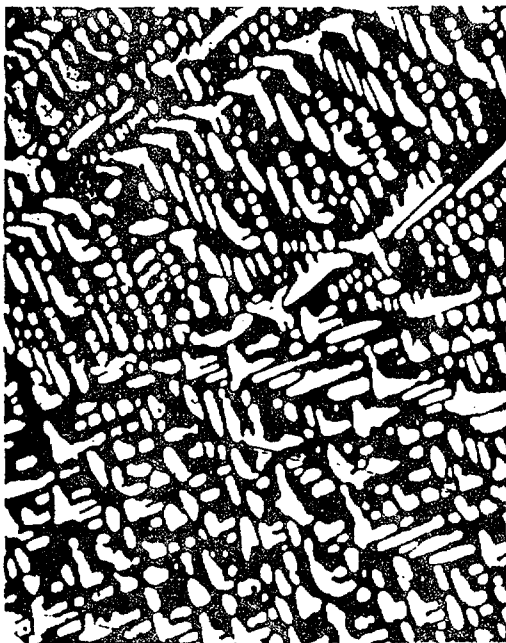


a. mikrostruktur bagian luar ingot

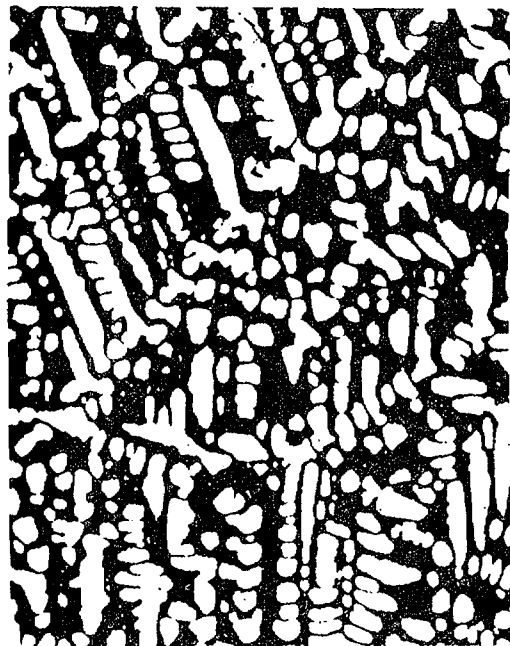


b. mikrostruktur bagian luar ingot

Gambar 2. Mikrostruktur ingot (Si 3,7%)
Gambar dihasilkan dengan metalografi optik, perbesaran 1000 x

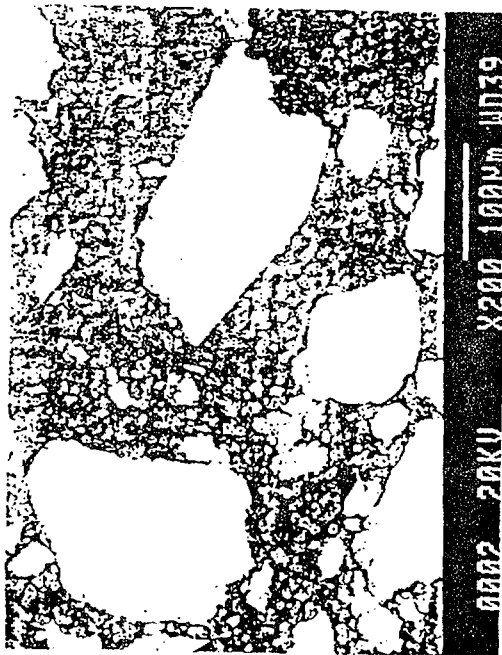


a. mikrostruktur bagian luar ingot

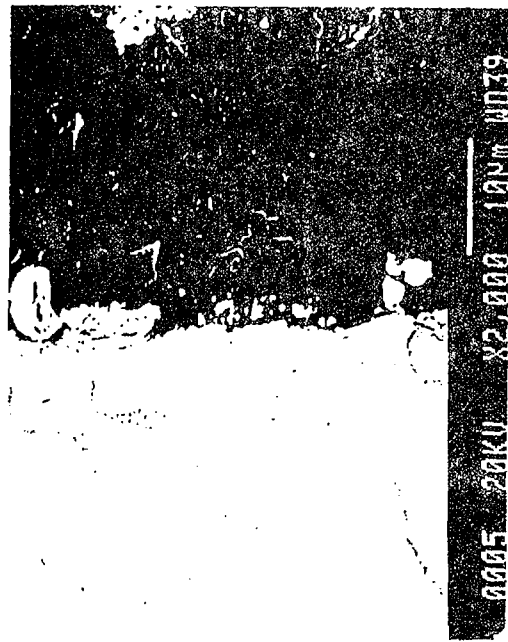


b. mikrostruktur bagian luar ingot

Gambar 3. Mikrostruktur ingot (Si 3,0%)
Gambar dihasilkan dengan metalografi optik, perbesaran 200 x

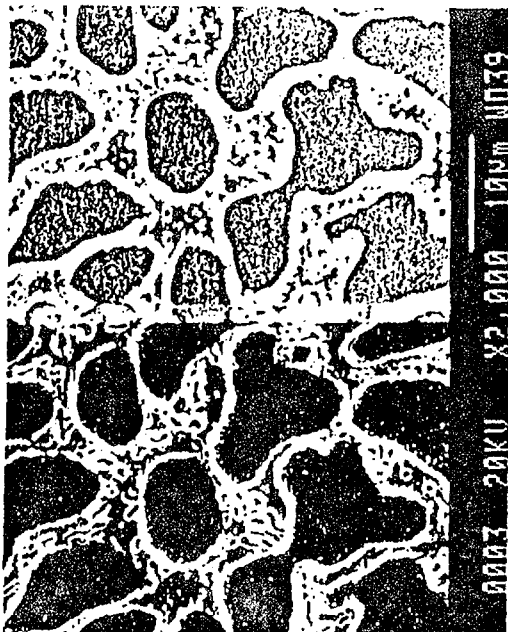


a. Dispersi bahan bakar daging



c. Citra SEM dari batas bahan bakar dan bahan matriks

Gambar 4. Citra SEM dari pelat elemen bakar



b. Citra SEM dari butir bahan bakar

pada suhu tinggi, sehingga kesempatan menumbuhkan kristal dendrit menjadi lebih tersedia. Peran ukuran boleh jadi akan penting artinya bagi fabrikasi karena dengan perbedaan ukuran dendrit maka sebagai akibatnya ukuran celah berisi U bebas akan berubah pula dan kesempatan membentuk kontak dengan Al dan saling mendifusi pun berbeda.

Proses fabrikasi yang diawali dengan proses pulverisasi sedikit mengalami hambatan karena ingot yang bersifat jauh lebih liat dari pada U_3Si_2 yang rapuh. Sebagai akibatnya, banyak fraksi serbuk yang berujung serpih panjang dari pada yang berupa butir bulat. Dikhawatirkan, proses pulverisasi yang berkepanjangan ini akan mengundang persenyawaan dengan oksigen yang akan mengubah sebagian U bebas menjadi U_3O_8 yang stabil tetapi berdensitas relatif rendah.

Pengamatan terhadap irisan pelat elemen bakar eksperimental seperti ditunjukkan oleh citra mikrostruktur dengan *Scanning Electron Microscope* (SEM) pada Gambar 4a, 4b dan 4c. Gambar 4a menunjukkan tebaran butir bahan bakar campuran (Si 3,7 %) di dalam matriks Al. Gambar 4b memperlihatkan mikrostruktur dari bahan bakar campuran di dalam sistem dispersi. Kenampakan ini berbeda dengan kenampakan

mikrostruktur dari bahan sama sebelum difabrikasi (lihat Gambar 2a dan 2b). Mungkin di bawah pengaruh suhu perolan dan tekanan *roller*, maka bentuk dendrit berubah menjadi lebih membulat. Gambar 4c memperlihatkan bidang batas antara butir bahan bakar dan bahan matriks disekitarnya. Untuk sementara ini belum dapat diamati adanya interaksi berupa munculnya fasa "ketiga" sebagai hasil dari *interdiffusion* yang diharapkan sudah mulai terjadi pada proses fabrikasi (perolan) yang menggunakan waktu lebih kurang 1 jam, suhu sekitar 425° C dan tekanan rol yang cukup tinggi (tetapi tidak terukur).

Perlu dicatat disini, percobaan pembuatan pelat eksperimental dengan bahan bakar berkadar Si 3,0 % belum dapat dilakukan pencekan apa yang terjadi dengan bahan bakar tersebut.

SIMPULAN

Pengusulan bahan bakar kandidat berupa campuran U_3Si_2 dan U berlebih didesain akan memberikan solusi akan kebutuhan bahan bakar dengan densitas tinggi. Bahan bakar ini, pada komposisi 3,0 % dan 3,7 % Si telah berhasil disintesis dan telah pula dipulverisasi dengan sedikit kesulitan karena sifatnya yang jauh lebih liat daripada U_3Si_2 . Penyiapan serbuk yang terlalu lama dapat mengundang masuknya oksigen yang berakibat pada susutnya densitas campuran karena sebagian U bebas akan membentuk U_3O_8 .

Mikrostruktur dari kedua bahan bakar campuran menunjukkan kemiripan struktur, yaitu didominasi oleh bekuan U_3Si_3 berbentuk dendritik yang mudah sekali membesar ukurannya karena pemanasan dan waktu. Perubahan akibat waktu dan pemanasan ini dapat memberikan keuntungan dan kerugian terhadap kemungkinan berlangsungnya reaksi *interdiffusion* antara U dan Al yang diharapkan akan menyusut jumlah U bebas, sehingga diduga akan menjadi faktor kuat yang meningkatkan akseptabilitas bahan bakar campuran. Hal serupa juga diharapkan dari proses pulverisasi, di mana ukuran partikel dapat menjadi faktor kuat yang menentukan laju reaksi difusi yang disebutkan di muka.

Dari percobaan penyiapan pelat eksperimental (baru dengan campuran bahan bakar pada komposisi Si 3,7 %) belum berhasil menunjukkan adanya reaksi interdifusi yang diharapkan. Ini barangkali memerlukan upaya aniling lebih lama pada suhu lebih tinggi terhadap pelat hasil rol, yang diharapkan akan memberikan *enhancement* terhadap reaksi difusi itu. Upaya ini

akan menjadi salah satu program lanjut dari penelitian ini.

Enhancement of diffusion by irradiation boleh-jadi sangat menonjol apabila bahan bakar dalam status terdispersi di dalam pelat diiradiasi. Oleh karena itu program iradiasi juga akan diadakan untuk mengamati keboleh-jadian tersebut.

Jadi penelitian ini masih sangat perlu dilanjutkan dengan melengkapi percobaan berkait dengan campuran bahan bakar pada komposisi Si 3,0 % yang belum diselesaikan, dan kemudian menambahkan pula program aniling terhadap pelat pada suhu lebih tinggi dan waktu lebih lama serta mengadakan percobaan iradiasi mini pelat dari kedua bahan bakar.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terimakasih disampaikan pertama kepada Sdr. Yuwono, mahasiswa PATN yang sedang mengerjakan penelitiannya dalam bidang yang ikut mendukung penelitian ini. Selain itu, para penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Sdr. Nusin Samosir yang banyak membantu dalam pengoperasian SEM untuk mendapatkan citra SEM dari pelat eksperimental.

PUSTAKA

1. Domagala, R.F., Phase in U-Si Alloys, Proc. of the International RERTR Meeting, October 1986, ANL/RERTR/TM-9 (Juli 1988).
2. US-NRC, Safety Evaluation Report Related to the Evaluation of Low-Enriched Uranium Silicide-Aluminium Dispersion Fuel for Use in Non-Power Reactors, US-NRC Report NUREG-1313 (1988).
3. Suwarno, H., et al, Eksperimental Work on $UxSi_y$ Fuel Powder Preparation, Proc. of the 2nd Asian Symposium on Research Reactor, Jakarta 1989 (1992).
4. Soentono, S. and Suropto, A., Attempt to Produce Silicide Fuel Element in Indonesia, Proc. of the 12th Conf. on RERTR, Berlin 1989 (1991).
5. Arbie, B., in a Doctorate Thesis to be submitted in 1996. Suropto, A., et Terms of Reference (TOR) Proyek PPTTEBN, BATAN-PEBN (1993).
6. Domagala, R.F., et al, Some Properties of U-Si Alloys in the Composition Range U_3Si to U_3Si_2 , *ibid.*

7. Supardjo, Karakterisasi Paduan UxSi_y pada daerah komposisi antara 6,62 s/d 7,63 % Si, Tesis Magister, Institut Teknologi Bandung, 1993.
8. Green, D.R., Diffusion of Uranium and Aluminium- Silicon Eutic Alloy, Handford Atomic Product Operation Report HW-49697 (1957).

TANYA - JAWAB

1. Eric Johneri

- Media apa yang digunakan dan berapa volume media tersebut dalam proses *quench* yang dilakukan. Karena hal tersebut akan sangat berpengaruh terhadap fasa dan perbandingannya. Dengan teknik *quenching* serta media yang dipakai ada kemungkinan sifat *activity* berkurang sehingga pulverisasi bisa diatasi !.

Asmedi Suropto

- *Quenching* berlangsung dalam rongga tungku induksi sendiri yang bersuasana sub tekanan berisi argon. Sangat mengharapkan saran, apabila ada, yang dapat membantu metoda penyiapan *ingot* yang tidak lagi terlalu liat.

2. Mulyadi R

- Bila temperatur fabrikasi yang Saudara lakukan rendah, maka menurut pendapat saya tak mungkin terjadi reaksi UAl (temperatur melting U > 2000° dan Al > 600° C). Karena bila diharapkan terjadi difusi harus diatas atau mendekati temperatur tersebut.

Asmedi Suropto

- Temperatur fabrikasi tidak terlalu rendah, sekitar 420 - 500° C dengan waktu beberapa jam dan dengan tekanan rol beberapa ton/cm². Jadi wajar mengharapkan terjadinya hal itu mengingat penelitian sebelumnya telah membuktikan adanya difusi tersebut.

3. Bambang Galung Susanto

- Kalau melihat dari hasil penelitian ini, ternyata U bebas tidak bisa diharapkan menjadi U Alx. Bagaimana pendapat Saudara kalau pada penelitian ini arah dirubah sedikit

yaitu masing-masing dibuat paduan UAlx dan U₃Si₂ kemudian pada fraksi berat tertentu digabung dengan matrix Al agar diperoleh tingkat muat tinggi sekaligus U terikat dengan Al.

Asmedi Suropto

- Penggabungan diluar berakibat densitas campuran sangat rendah U₃Si₂ 12,2 g/cc dan UAl₃ 5,4 g/cc. Untuk memasukkan campuran kedalam pelat, akan ada kesulitan fabrikabilitas yang terbatas pada 45 - 50 % vol. bahan bakar.

4. As Natio Lasman

- Saya pernah mendengar, bahwa dari sisi fabrikasi elemen bakar pelat dengan U₃Si₂ ternyata terdapat optimasi ekonomi produksi/fabrikasi. Untuk densitas U-235 < 4 gr U/cc ternyata tidak/kurang ekonomis bila dibanding dengan densitas ≥ 4 gr U/cc. Andai pernyataan tersebut benar, mengapa dalam rencana produksi U₃Si₂-Al yang dilakukan digunakan kerapatan < 4 gr U/cc ?.

Asmedi Suropto

- Memang benar, bila dipandang dari kacamata operator reaktor, karena densitas tinggi (muatan-tinggi) akan : memperpanjang *life time* → *less fabric cost/cycle*, teras bisa dengan # of fuel elements lebih sedikit. Tetapi bila muatan terlalu tinggi, maka *burnup* tidak dapat terlalu diharapkan membesar terus, karena ketahanan bahan struktur yang membatasinya. Semua diatas adalah dari logika pikir fabrikator, menanggapi jalan pikiran operator.

5. Gunandjar

- Pada kesimpulan disebutkan bahwa pembuatan bahan baru (dengan konsep baru) tidak sulit. Mohon dijelaskan tidak sulit (tingkat kesulitan) tersebut relatif terhadap bahan bakar U₃Si₂ atau terhadap U₃Si ?.
- Dari segi waktu yang dibutuhkan untuk pembuatan bahan bakar baru. Berapa waktu yang diperlukan dan bagaimana jika dibanding dengan U₃Si (pada U₃Si disebutkan perlu waktu pemanasan selama 3 hari setelah pembekuan) ?.

Asmedi Suropto

- Terhadap U_3Si_2 , dan terlebih terhadap U_3O_8 yang sulit. U_3Si belum pernah kita buat dan coba.
- Sengaja untuk bahan bakar baru tidak ada *aniling*, jadi yang dipakai adalah hasil lebur *as cast*.

6. Sugondo

- Dalam kesimpulan ada pernyataan *Irradiation Enhanced Diffusion*, dalam hal

ini saya kurang mengerti peningkatan difusi dalam hal apa, apakah difusi unsur atau difusi yang lain. Untuk hal ini mohon penjelasan ?

Asmedi Suropto

- Disini ditinjau *interatomic diffusion* saja dimana U dan Al diharapkan mengalami interdifusi cukup berarti.