



PENYIAPAN DAN PENGUJIAN PELAT ELEMEN BAKAR MINI U_3Si_2 -Al UNTUK UJI IRADIASI

Supardjo, Boybul, Yuwono, Susworo, dan Setia Permana
DIVISI PRODUKSI ELEMEN BAKAR NUKLIR
PT. BATAN Teknologi (Persero)

ABSTRAK

PENYIAPAN DAN PENGUJIAN PELAT ELEMEN BAKAR MINI U_3Si_2 -Al UNTUK UJI IRADIASI. Pelat elemen bakar dispersi U_3Si_2 -Al dengan pemuatan uranium masing-masing 3,55, 4,20, dan 4,80 g/cm³ telah dibuat dengan mendispersikan serbuk U_3Si_2 dalam jumlah tertentu ke dalam serbuk matriks Al secara homogen. Perbandingan berat serbuk U_3Si_2 dan serbuk Al pada setiap pemuatan berbeda-beda didasarkan pada hasil perhitungan dengan basis volume Inti Elemen Bakar (IEB) 19,23 cm³. Setiap campuran bahan bakar dipres menjadi IEB berukuran 100,20 x 60,35 x 3,15 ± (0,05) mm yang kemudian dipotong-potong menjadi IEB mini berukuran 16 x 8 x 3,15 ± (0,05) mm. Pelat Elemen Bakar (PEB) mini dibuat dengan teknik *picture and frame* dan AlMg2 digunakan sebagai kelongsong. Pengujian PEB mini meliputi uji *blister*, homogenitas, *white spots*, cacat permukaan dan tebal kelongsongnya. Dibandingkan dengan disain PEB mini U_3Si_2 -Al dan spesifikasi elemen bakar RSG-GAS, analisis terhadap 74 PEB mini mengungkapkan 10 PEB mini (*blister*: 4 PEB dan *white spots*: 6 PEB) yang harus ditolak karena cacat, sedang sebanyak 64 PEB mini dapat dirakit menjadi kupon-kupon untuk uji iradiasi.

ABSTRACT

THE EXPERIMENT PRODUCTION AND EXAMINATION OF THE U_3Si_2 -Al MINI-PLATES FOR IRRADIATION TEST. The fuel plates containing U_3Si_2 -Al dispersion fuel having respective loadings of 3.55; 4.20; and 4.80 g/cm³ were prepared by dispersing certain amount of U_3Si_2 powder in the Al powder as matrix. The weight ratio of U_3Si_2 and Al at different loading was chosen based on the 19.23 cm³ volume basis fuel core calculation. Each fuel mixture was pressed into a fuel core having dimension of 100.20 x 60.35 x 3.15 ± (0.05) mm, which was then cut into mini fuel core having dimension of 16 x 8 x 3.15 ± (0.05) mm. The mini plates were prepared by picture and frame technique using AlMg2 as cladding material. The mini plates have been tested for blister, homogeneity, white spots, surface defects and their cladding thickness, revealing that out of 74 mini plates, there are ten (10) mini plates that have to be rejected due to blisters and white spots, thus of 64 mini plates can be further fabricated as samples for irradiation test.

PENDAHULUAN

Pada kurun waktu dasa warsa terakhir, penelitian bahan bakar dispersi untuk Reaktor Riset di BATAN diarahkan pada penggunaan paduan Uranium Silisida, dalam rangka pengembangan bahan bakar dispersi jenis U_3O_8 -Al yang sekarang diproduksi. Pengembangan bahan bakar tersebut selaras dengan penelitian bahan bakar dispersi untuk Reaktor Riset di dunia dalam upaya mendapatkan bahan bakar berdensitas tinggi untuk mengkompensasi penggunaan bahan bakar berperkayaan rendah (± 20 % U-235)^[1].

Paduan U_3Si_2 merupakan alternatif dengan pertimbangan bahwa sifat-sifatnya sesuai yang disyaratkan bahan bakar nuklir untuk reaktor riset, serta dengan berat jenisnya yang cukup tinggi, maka pemuatan uranium di dalam bahan bakar (pada volume yang sama) dapat lebih banyak dibanding penggunaan bahan bakar U_3O_8 atau UAl_x . Dengan meningkatkan pemuatan uranium di dalam bahan bakar pada volume tetap diharapkan dapat mengkompensasi penurunan perkayaan U-235, sehingga reaktivitas teras di dalam reaktor minimal dapat dipertahankan seperti pada

penggunaan bahan bakar perkayaan tinggi ($\pm 93\%$ U-235)^[1,2].

Penyiapan dan pengujian bahan bakar U_3Si_2-Al dengan pemuatan U hingga $4,80\text{ g/cm}^3$ (pra iradiasi) telah selesai dilakukan dengan kualitas sesuai yang dipersyaratkan bahan bakar reaktor riset. Beberapa rakitan elemen bakar dengan pemuatan $3,0\text{ g/cm}^3$ telah dikenai uji iradiasi hingga *burn-up* 50,29 %, dan hasil uji pasca iradiasi menunjukkan bahwa elemen bakar tersebut masih cukup baik dan memungkinkan untuk dinaikkan *burn-up* nya^[3]. Dengan mengacu data uji iradiasi dan pasca iradiasi, maka hal tersebut mendorong untuk dilakukannya uji iradiasi terhadap bahan bakar dengan pemuatan uranium yang lebih tinggi. Untuk menjamin keselamatan dan penghematan bahan terutama uranium, maka penyiapan uji iradiasi EB U_3Si_2-Al dengan pemuatan uranium $>3,0\text{ g/cm}^3$ akan dilakukan terhadap PEB dalam bentuk mini, seperti disain yang ditampilkan pada Gambar 1^[4].

Telah tersedianya fasilitas produksi elemen bakar reaktor riset di Divisi Produksi EBN, PT.BATAN Teknologi (Persero), fasilitas iradiasi di PRSG, fasilitas pengujian bahan bakar pasca iradiasi di IRM-PEBN, dan kesiapan SDM yang sudah berpengalaman akan sangat mendukung keberhasilan penelitian dan pengembangan elemen bakar U_3Si_2-Al .

Pada laporan teknis ini, dapat diperoleh data produksi dan kualitas PEB mini yang sesuai dengan disain PEB mini U_3Si_2-Al dan persyaratan EB RSG-GAS, sehingga dapat memenuhi syarat uji iradiasi.^[4,5,6] Keberhasilan penelitian pengembangan bahan bakar dispersi U_3Si_2-Al pemuatan tinggi, nantinya akan dikembangkan ke dalam skala produksi untuk tujuan komersial.

TATA KERJA

Tahapan pembuatan PEB mini dapat diuraikan sebagai berikut :

Pembuatan paduan U_3Si_2

Bahan baku yang digunakan di dalam percobaan ini adalah logam uranium berperkayaan 19,75% U-235 (hasil proses reduksi kalsiotermik) dan logam silikon berkadar 99,99% diperoleh dari ANL (Argonne National Laboratory) USA.

Porsi campuran (U + 7,5 % Si) seberat $\pm 130\text{ g}$, dilebur di dalam tungku busur listrik berlingkungan gas Ar dengan tekanan $< 1\text{ bar}$. Setiap porsi campuran dilebur 5 x, selanjutnya ingot hasil peleburan digerus dan di ayak menggunakan ayakan berukuran 90 dan 40 μm .^[7,8]

Inti Elemen Bakar (IEB) mini

Serbuk U_3Si_2 berukuran butir (-90 +40) μm dan - 40 μm dicampur dengan serbuk matriks Al berukuran $< 10\text{ }\mu\text{m}$ dalam perbandingan tertentu hingga mendapatkan pemuatan uranium masing-masing 3,55; 4,20; dan $4,80\text{ g/cm}^3$, kemudian masing-masing porsi campuran tersebut dibuat IEB dengan cara pengepresan pada tekanan $\pm 170\text{ bar}$. Masing-masing IEB hasil pempresan dikenai pengukuran dimensi, berat, dan penentuan kadar U-235 nya.

Pelat Elemen Bakar (PEB) Mini

Dimensi IEB hasil pengepresan yang berukuran $100,20 \times 60,35 \times 3,15 (\pm 0,05)\text{ mm}$ dipotong-potong menjadi IEB berukuran $16 \times 8 \times 3,15 (\pm 0,05)\text{ mm}$, kemudian dikenai pengukuran dimensi dan berat, yang selanjutnya dianil dalam tungku hampa bertekanan $1 \times 10^{-6}\text{ mbar}$ selama 3 jam.^[6] Setelah itu, masing-masing IEB mini disisipkan pada pelat pigura, kemudian ditutup dengan pelat AlMg2 membentuk komposit yang pada beberapa bagian keempat sisi sambungan komposit tersebut di las TIG. selanjutnya dirol panas dan dingin menjadi PEB. Setelah melalui proses pemotongan sesuai dengan ukuran disain PEB mini, ia dikenai pengujian *blister*, *white spots*, homogenitas, cacat permukaan, dan tebal kelongsongnya. Data hasil pengujian tersebut dievaluasi dengan membandingkan terhadap disain PEB mini dan spesifikasi PEB yang digunakan sebagai Elemen Bakar RSG-GAS.

HASIL DAN BAHASAN

Bahan baku logam uranium pada percobaan ini memiliki kemurnian sebesar 99,07 %, sedang logam Si dengan kemurnian 99,99% diperoleh dari *Argonne National Laboratory (ANL)*, USA. Kemurnian logam Si sudah memenuhi persyaratan sebagai bahan pemadu, sedangkan kemurnian logam uranium masih terlalu rendah untuk digunakan sebagai bahan bakar nuklir. Rendahnya kemurnian logam U kemungkinan kondisi proses reduksi kalsiotermik kurang sempurna sehingga terdapat logam Ca (reduktor) dan logam Mg (pemicu reaksi) tercampur di dalam logam U saat proses pendinginan berlangsung. Adanya unsur-unsur penyerta di dalam logam U ini terutama yang mudah menguap akan berkurang/menguap pada saat proses peleburan pembuatan paduan.

Logam U sangat reaktif terhadap oksigen dan bereaksi cepat membentuk lapisan oksida uranium pada permukaannya. Oksida uranium tersebut dan kontaminan lainnya yang terikut selama proses penyiapan serpihan logam U untuk peleburan harus dihilangkan agar tidak membentuk kontaminan baru sehingga melebihi jumlah yang diijinkan. Pengusiran kontaminan yang terikut di permukaan logam U pada percobaan ini dilakukan dengan pencucian secara kimia menggunakan bahan berturut-turut HNO₃ pekat bersuhu 70°C, *Tetrachloro-ethylene*, air dan alkohol, permukaan pelat logam U secara visual terlihat cukup bersih dan mengkilap. Dengan cara ini waktu pencelupan di dalam HNO₃ pekat dan panas sangat perlu diperhatikan karena reaksinya sangat cepat, sehingga apabila pencelupan terlalu lama berakibat banyak U yang larut, yang pada akhirnya berdampak kerugian.

Komposisi campuran (U + 7,5 % Si) pada setiap peleburan, dengan jumlah logam Si sedikit berlebihan dari stoikiometrinya (U + 6,71% Si). Penetapan komposisi ini berdasarkan pada percobaan dan informasi dari pustaka yang menyatakan bahwa di dalam pembuatan suatu paduan tidak mungkin diperoleh paduan yang murni^[1]. Hal ini kemungkinan diakibatkan oleh sulitnya mendapatkan homogenitas paduan yang sempurna sehingga masih terdapat logam U dan Si yang tidak bereaksi. Kemungkinan lainnya adalah terdapat sebagian logam U/Si atau keduanya terlempar keluar dari cawan lebur pada saat proses peleburan

berlangsung. Dari hasil penelitian diperoleh data bahwa peleburan terhadap campuran antara 7,42 - 7,63 % Si, dengan 5 - 6 kali pengulangan pencairan diperoleh paduan U₃Si₂ yang optimal.^[5]

Seluruh ingot hasil peleburan teramati terdapat retak-retak dan rapuh. Kerapuhan ingot terbukti dari kemudahannya pembuatan serbuk dengan penggerusan. Sifat rapuh ingot kemungkinan disebabkan adanya ikatan terbuka antara atom Si-Si di dalam kristal U₃Si₂, sehingga dengan adanya sedikit energi dari luar, ikatan antar butir mudah terpisahkan⁽⁶⁾. Paduan U₃Si₂ bersifat piroporik dan mudah bereaksi dengan oksigen, sehingga selama proses pembuatan ingot, penggerusan dan pengayakan harus dilakukan didalam tempat tertutup bermedia gas argon.

Komposisi diameter butir serbuk hasil penggerusan ingot U₃Si₂ terdiri atas - 90 + 40 µm sebanyak 80 % dan diameter butir <40 µm sebanyak 20 %. Komposisi ini sangat dipengaruhi oleh waktu pembuatan serbuk dengan *ball mill*. Bila terlalu lama maka banyak serbuk yang halus, sedang bila waktunya terlalu singkat banyak serbuk yang kasar sehingga tidak masuk kisaran yang telah ditetapkan. Distribusi butir ini telah memenuhi persyaratan bahan bakar reaktor riset dengan komposisi butir - 90 + 40 µm berkisar antara 75 sampai dengan 85% dan butir < 40 µm antara 15 sampai dengan 25%.^[1]

Berat jenis serbuk U_xSi_y hasil pengukuran diperoleh sebesar 12,14 g/cm³, lebih rendah dari berat jenis U₃Si₂ teoritiknya yaitu sebesar 12,20 g/cm³ (stoikiometrik U + 6,39 % Si). Bila dibanding berat jenis senyawa-senyawa di dalam diagram fasa U-Si, maka serbuk U_xSi_y lebih mendekati senyawa U₃Si₂ daripada senyawa terdekatnya yaitu U₃Si (15,20 g/cm³) dan USi (10,90 g/cm³). Dengan data tersebut menunjukkan bahwa serbuk U_xSi_y didominasi oleh senyawa U₃Si₂.

Hasil analisis uranium di dalam serbuk U₃Si₂ diperoleh sebesar 92,51 % (penimbangan awal 92,50 %), dengan unsur logam penyerta terdiri atas Al : 426,00 ppm, B : 0,50 ppm, Ca : 32,98 ppm, Cu : 252,00ppm, Zn:100,20 ppm, Fe:150,00 ppm, Ni : 51,42 ppm, dan Si (tidak dianalisis). Kadar U di dalam serbuk U₃Si₂ hasil analisis hanya terjadi penyimpangan sebesar 0,01 %

dibanding kadar U dalam campuran U dan Si saat penimbangan porsi lebur. Ini menunjukkan bahwa selama pengerjaan terutama pada proses peleburan cukup baik. Jumlah unsur-unsur logam penyerta dibatasi oleh hasil perhitungan Boron Ekuivalennya. Perhitungan dengan cara menjumlahkan hasil pengkalian kadar dan faktor masing-masing unsur logam (selain U dan Si) dan diperoleh nilai Boron Ekuivalen sebesar 1,44215 ppm. Nilai tersebut masih memenuhi spesifikasi standar Elemen Bakar RSG-GAS yang membatasi Boron Ekuivalen maksimum sebesar 10 ppm, sehingga serbuk U_3Si_2 dapat diproses lebih lanjut menjadi elemen bakar.^[5]

Data uji serbuk U_3Si_2 menggunakan Difraksi Sinar-X tertera pada Gambar 2. nampak bahwa serbuk tersusun atas fasa-fasa U_3Si_2 , U_3Si , U-Si, dan U_{ss} , yang secara kualitatif jumlah fasa U_3Si_2 paling dominan. Dengan mengamati data analisis kimia, berat jenis dan komposisi fasanya menunjukkan bahwa dominasi senyawa didalam serbuk adalah U_3Si_2 , dan memenuhi syarat untuk di proses lebih lanjut menjadi bahan bakar nuklir.

Bahan bakar dispersi U_3Si_2 -Al berbagai pemuatan uranium merupakan campuran antara serbuk U_3Si_2 dan serbuk matrik Al (ϕ butir - 10 μm) dengan berat masing-masing pemuatan ditentukan melalui penimbangan berdasarkan data uji/analisis serbuk dan volume IEB hasil pres dianggap tetap sebesar 19,23 cm^3 . Perbandingan berat serbuk U_3Si_2 dan serbuk Al hasil perhitungan ditunjukkan pada Tabel 1. Pada Tabel itu terlihat bahwa makin tinggi pemuatan jumlah uranium bertambah, sedang jumlah matriks Al menurun. Perbedaan porsi timbang ini secara teoritis IEB hasil pres akan memiliki volume yang sama.

Teknik pengukuran tebal setiap IEB seperti yang ditampilkan pada Gambar 3. Hasil akhir pengukuran tebal merupakan rerata nilai pengukuran kelima titik tersebut, karena nilai pengukuran kelima titik pada setiap IEB jarang diperoleh angka yang sama. Perbedaan tebal dari pengukuran lima titik pada setiap IEB kemungkinan disebabkan tingkat kerataan serbuk dipermukaan *dies* kurang sempurna sebelum pengepresan dilakukan. Walaupun demikian tebal rerata seluruh IEB dalam percobaan ini masih berada di dalam batas yang

disyaratkan, yaitu sebesar (3,15^{+0,05} mm).

Teramati IEB bersifat getas, dan makin tinggi pemuatan uranium makin getas, sehingga pemotongan bertambah sulit. Oleh karena itu, selama pemotongan dilakukan sangat hati-hati dan menggunakan alat bantu tambahan sebagai pemegang. Untuk menghindari percikan api selama pemotongan IEB karena sifat U_3Si_2 yang piroporik, maka di dalam percobaan ini dilakukan di dalam *glove box* berlingkungan gas argon. Dengan cara ini pengerjaannya lebih mudah dan aman.

Kadar U-235 di dalam IEB mini ditentukan dengan penimbangan berdasar kadar U-235 di dalam IEB awal hasil pengepresan. Kadar U-235 rerata di dalam IEB mini pada Tabel 2 terlihat bahwa makin tinggi pemuatan uranium jumlah U-235 nya semakain banyak. Penentuan kadar U-235 dengan cara ini dengan asumsi bahwa serbuk U_3Si_2 dan serbuk Al di dalam IEB tercampur homogen.

Kualitas pengelasan komposit rol memberikan andil yang cukup besar terhadap keberhasilan produk PEB. Apabila kualitas pengelasan kurang baik maka pada waktu pengerolan akan terjadi pergeseran diantara tiga lapisan pelat yang memungkinkan terbentuk cacat berupa *white spots*, *blister*, dimensi *meat* dan lain-lain yang berakibat PEB harus ditolak. Dalam percobaan ini pengelasan menggunakan jenis las *Tungsten inert Gas* (TIG) dengan sistem pengelasan (Gambar 4), diperoleh hasil yang cukup baik.

Pengerolan panas terhadap paket rol dilakukan beberapa tahap untuk menghindari kerusakan PEB akibat deformasi yang berlebihan. Kerusakan PEB hasil perolan dihindari dengan cara reduksi tebal setiap tahap pengerolan tidak lebih dari 25 %. Dalam percobaan ini pengerolan dilakukan empat tahap, dengan reduksi tebal berturut-turut 8,5 - 7,00 - 5,60 - 2,60 - 1,65 \pm 0,05 mm. Dengan langkah itu terbukti diperoleh pelat yang cukup baik, dan pengamatan visual dari 74 PEB mini yang dibuat tidak ditemukan adanya cacat/lepuhan. Setelah pengerolan dingin hingga ketebalan 1,3 \pm 0,07 mm dilakukan pemotongan menjadi PEB mini dengan ukuran 70 x 60 x 1,3 (\pm 0,07) mm dengan *meat* tepat berada ditengah-tengahnya, dilanjutkan pengujian secara merusak dan tak merusak.

Pengujian seluruh PEB mini dengan Radiografi Sinar-X diperoleh keluaran rekaman data dalam film. Film rekaman data dari 74 PEB mini teramati adanya noda putih (*white spots*) kecil-kecil yang tersebar di luar *meat* bahan bakar pada 6 PEB mini. Munculnya noda putih ini kemungkinan kurang simetrinya ukuran IEB dan lubang pelat pigura sehingga pada waktu pengerolan terdapat serbuk bahan bakar yang terlempar dan masuk diantara pelat pigura dan pelat tutup. Informasi lain menunjukkan bahwa distribusi uranium di dalam *meat* cukup homogen, bentuk ujung-ujung *meat* cukup baik dan panjang *meat* dari seluruh PEB mini berkisar antara 46 sampai dengan 52 mm (perkiraan pemanjangan IEB mini menurut disain sebesar 48 mm). Perbedaan pemanjangan *meat* yang bervariasi ini disebabkan beberapa kemungkinan antara lain, ketebalan *meat* yang tidak seragam (bervariasi), dan panjang IEB awal ke arah rol yang tidak sama karena kesulitan preparasinya. Namun perbedaan ini sudah diantisipasi pada saat disain awal karena kesulitan preparasinya. Sebagai contoh PEB hasil perolan ditunjukkan pada Gambar 5.

Pengujian dengan alat Ultrasonik menunjukkan bahwa sebagian besar PEB berkualitas cukup baik, dan hanya 4 dari 74 PEB yang bernoda *blister* (lepuhan) dan hal itu harus ditolak. Lepuhan yang terbentuk kemungkinan disebabkan oleh adanya udara yang terperangkap pada saat pengerolan berlangsung, atau kemungkinan lain terdapat hidrogen yang terikat di dalam pelat (kelongsong AlMg2).

Tebal kelongsong diukur dengan teknik uji merusak. Preparasi sampel uji tebal kelongsong PEB dilakukan dengan pemotongan PEB seperti terlihat pada Gambar 6. Setiap pemuatan diambil satu contoh PEB sebagai sampel uji dengan hasil pengukurannya seperti ditunjukkan pada Tabel 3. Data pengukuran PEB mini dari ketiga macam pemuatan uranium tersebut (setiap pemuatan uranium diambil 1 sampel uji) seluruhnya mempunyai tebal kelongsong diatas tebal kelongsong minimum yang disyaratkan (0,25 mm).

Data uji yang telah dilakukan terhadap 74 PEB mini terdapat 4 PEB yang harus ditolak karena *blister* dan 6 PEB karena *white spots* dengan distribusi seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4, sedangkan

tebal kelongsong telah memenuhi di atas batas minimum (0,25 mm) yang disyaratkan.

SIMPULAN

1. Data pengamatan dan pengujian terhadap 74 PEB mini U_3Si_2-Al pada percobaan menunjukkan bahwa:
 - a. Dari sejumlah 74 PEB mini, 64 PEB (86,50%) memiliki karakteristik yang sesuai dengan disain PEB mini U_3Si_2-Al dan spesifikasi elemen bakar RSG-GAS untuk uji iradiasi, sedang sebanyak 10 PEB mini harus ditolak karena terdapat cacat lepuhan atau noda putih.
 - b. PEB mini yang ditolak masih cukup besar, hal ini disebabkan pembuatan IEB mini dan lubang pelat pigura dilakukan secara manual (pemotongan dengan gergaji) sehingga sulit untuk mendapat ukuran yang simetri.
2. Berdasarkan acuan dari data pengujian tersebut dan kesesuaiannya dengan data disain PEB mini U_3Si_2-Al dan spesifikasi elemen bakar RSG-GAS, maka sebanyak 64 PEB mini yang telah lolos uji, dapat dirakit ke dalam bentuk kupon untuk selanjutnya dilakukan uji iradiasi di reaktor.

UCAPAN TERIMA KASIH

Atas tersusunnya tulisan ini, ucapan terima kasih disampaikan kepada seluruh staf Divisi Produksi EBN., PT. BATAN Teknologi (Persero) yang telah membantu penelitian ini.

PUSTAKA

- [1]. HOFMAN, G. L., SNELGROVE, J. L., *Dispersion Fuels*, Nuclear Materials, Part 1, 1994.
- [2]. SUPARDJO, SARJONO, BOYBUL, *Pengaruh Tingkat Muat Uranium Terhadap Produk PEB U_3Si_2-Al* , Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir, Yogyakarta, (1995) 220-225.
- [3]. NASUTION, H., SURIPTO, A., *Pemeriksaan Pasca Iradiasi Elemen Bakar Bekas RSG-GAS*, Prosiding Seminar Sains dan Teknologi Nuklir, PPTN-BATAN, Bandung, (1995) 100-107.
- [4]. ENDIAH, P.H., KURNIA, P., SUPARJO, *Analisis Termo-hidrolika Disain Elemen Bakar Mini U_3Si_2-Al* , Prosiding

- Presentasi Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir, PEBN-BATAN, (1996) 266-273.
- [5]. Spesifikasi Elemen Bakar RSG-GAS.
- [6]. IAEA, *Standardisation of Specification and Inspection for LEU Plate Type Research Reactors*, IAEA-TEC.DOC.-467, Vienna, 1988.
- [7]. SUPARDJO, *Karakterisasi Paduan U_xSi_y Pada Daerah Komposisi Antara 6,62 sampai dengan 7,63 % Si*, Thesis Magister, ITB, 1993.
- [8]. PEBN-BATAN, *Prosedur Proses Produksi Bahan Bakar Dispersi UAl_x* , 1992
- [9]. DWIGHT, A.E, *A Study of The Uranium-Aluminum-Silicon System*, ANL-82-14, 1982.
- [10]. WIENCEK, T.C, *A Study of The Effect of Fabrication Variables*, Proceeding International Meeting, RERTR, ANL, 1996

TANYA JAWAB

Siti Amini

- Mengapa uji kandungan U^{235} dalam miniplat dilakukan dengan cara penimbangan bukan dengan MCA (*Multi Channel Analyzer*)? Bagaimana cara penimbangan yang dimaksud ?
- Mengapa desain plat menggunakan ukuran 6 x 7 cm ?

Supardjo

- Oleh karena belum mempunyai IEB standar dengan pemuatan uranium lebih besar dari $3,0 \text{ g/cm}^3$ maka belum dilakukan pengujian kandungan U^{235} dengan MCA. Metode penimbangan yang dimaksud adalah berat serbuk U_3Si_2 pada setiap pemuatan uranium sudah tertentu (berdasarkan perhitungan) sehingga dengan diketahuinya kadar U dan U^{235} dalam serbuk U_3Si_2 maka jumlah U^{235} dalam IEB dapat diketahui.

- Desain PEB berukuran 6 x 7 cm dengan pertimbangan untuk penghematan uranium, keselamatan operasi di Reaktor Serbaguna G.A. Siwabessy, dan disesuaikan dengan ukuran alat uji PEB pasca iradiasi yang dimiliki Instalasi Radiometalurgi.

Djibun Sembiring

- Apa tujuan pembuatan miniplat elemen bakar ?

Supardjo

- Tujuan pembuatan miniplat elemen bakar adalah untuk mengetahui unjuk kerja bahan bakar U_3Si_2 dengan variasi pemuatan uranium. Data-data yang diperoleh akan digunakan sebagai acuan dalam produksi elemen bakar U_3Si_2 dalam skala penuh.

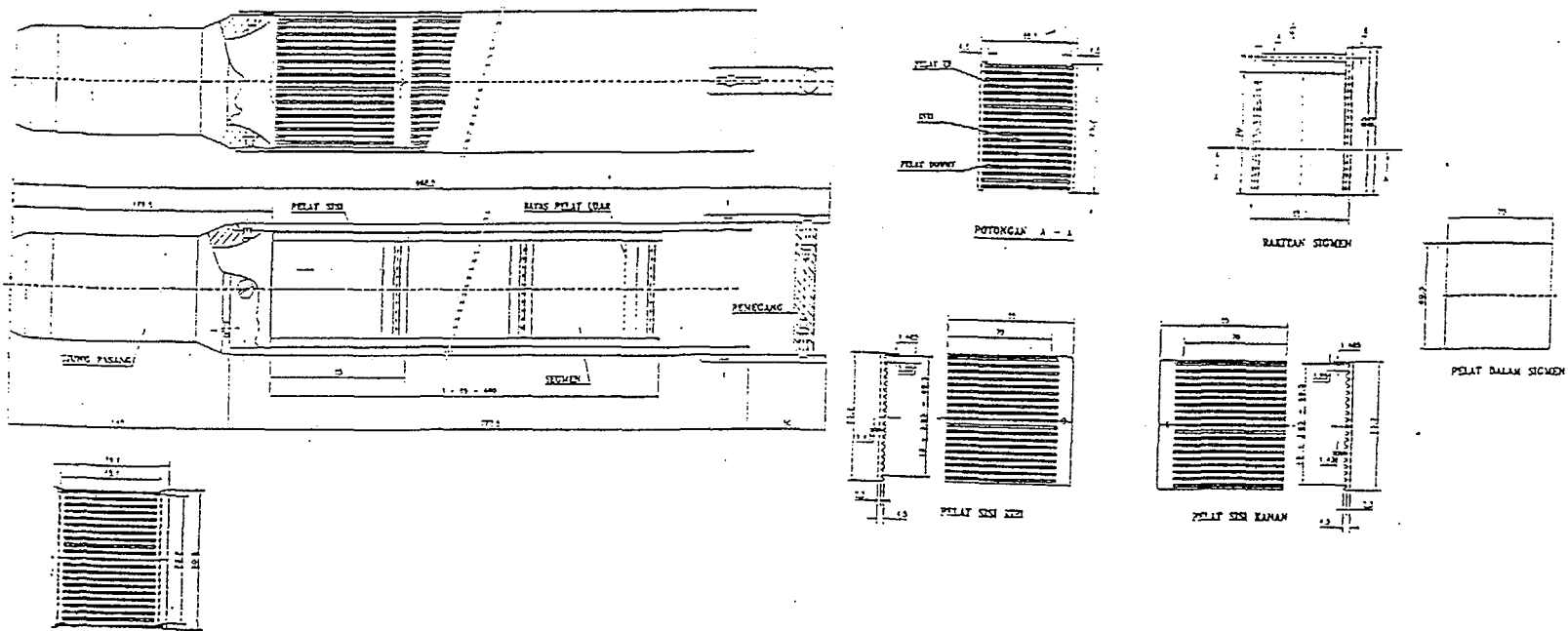
Tatang Mulyana

- Mohon dijelaskan, apakah proses pembuatan PEB perlu disempurnakan dan bagaimana langkah-langkah penyempurnaannya? Mengingat persentase kegagalan pembuatan PEB cukup tinggi yaitu 13,5%.
- Apakah mungkin dilakukan otomatisasi proses pembuatan PEB untuk menurunkan prosentase kegagalan ?

Supardjo

- Proses pembuatan PEB masih perlu disempurnakan. Langkah-langkah penyempurnaan yang dilakukan antara lain menggunakan material kelongsong dari paduan Al jenis lain atau merubah parameter fabrikasi.
- Proses pembuatan PEB tidak dapat dilakukan secara otomatisasi. Mengingat fasilitas peralatan proses pembuatan PEB yang dimiliki BATAN pada saat ini masih terbatas.

LAMPIRAN



Gambar 1. Susunan PEB mini di dalam Stringer.

Tabel 1. Komposisi berat U_3Si_2 dan Al pada setiap pemuatan uranium.

No	Pemuatan U/cm^3	Berat,g	
		Serbuk U_3Si_2	Serbuk Al
1	3,55	78,08	31,46
2	4,20	92,38	28,27
3	4,80	105,61	25,33

TABEL 2. Kadar U-235 dalam IEB mini.

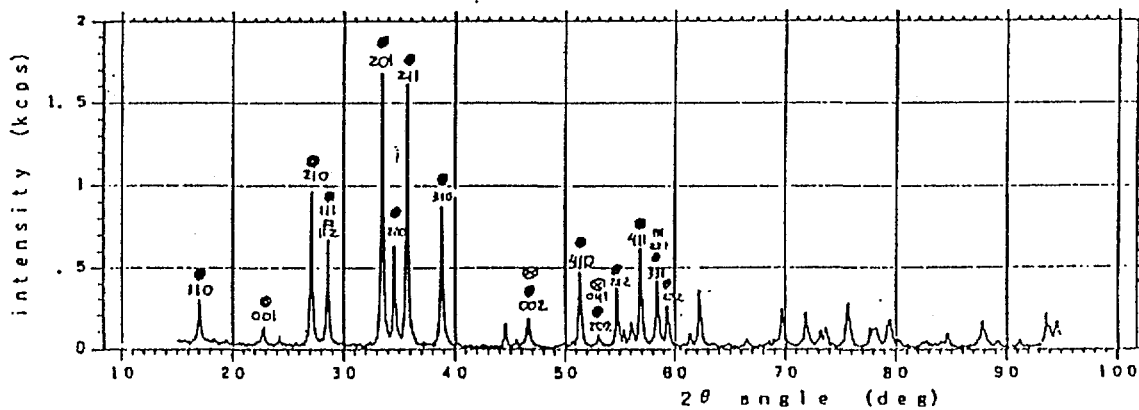
No	Pemuatan U, g/cm^3	Berat U-235 rerata dalam IEB mini, g
1	3,55	0,28
2	4,20	0,33
3	4,80	0,37

Tabel 3. Tebal kelongsong PEB mini.

No	Pemuatan U, g/cm^3	Tebal kelongsong, mm					
		sisi jauh		tengah		sisi dekat	
		min.	Rerata	min.	rerata	min.	rerata
1	3,55	0,411	0,447	0,362	0,409	0,430	0,446
		0,358	0,415	0,371	0,423	0,378	0,429
2	4,20	0,350	0,396	0,324	0,376	0,317	0,383
		0,307	0,389	0,378	0,424	0,382	0,454
3	4,80	0,254	0,362	0,339	0,395	0,296	0,421
		0,276	0,364	0,398	0,430	0,336	0,413

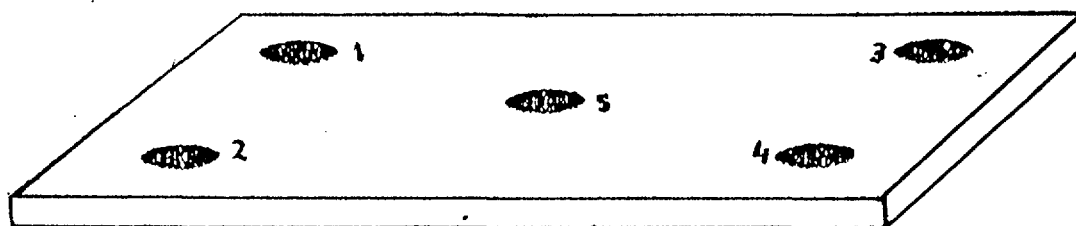
Tabel 4. Distribusi kegagalan PEB mini.

No	Pemuatan U, g/cm^3	Jumlah PEB	Rijek	
			Blister	White spots
1	3,55	26	3	2
2	4,20	22	0	0
3	4,80	26	1	4

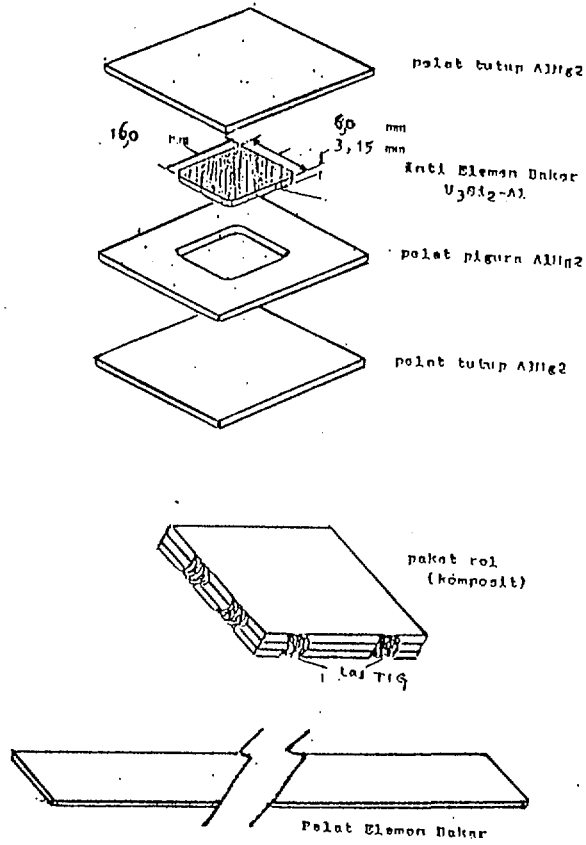


• U_3Si_2 □ U_3Si ⊗ USi ○ U ▣ UO_2

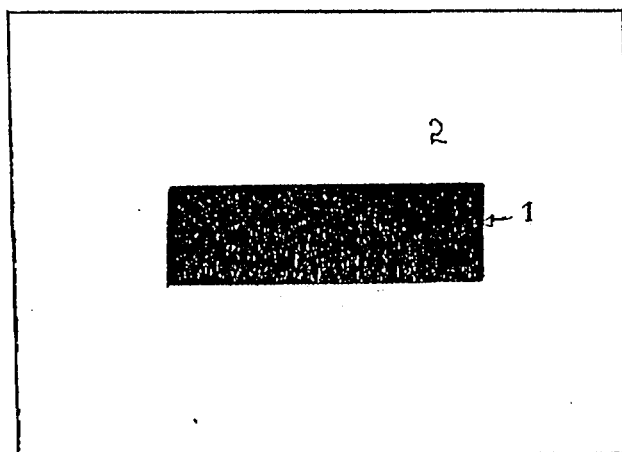
Gambar 2. Fasa-fasa di dalam Serbuk U_3Si_2 .



Gambar 3. Titik-titik Pengukuran Tebal IEB.

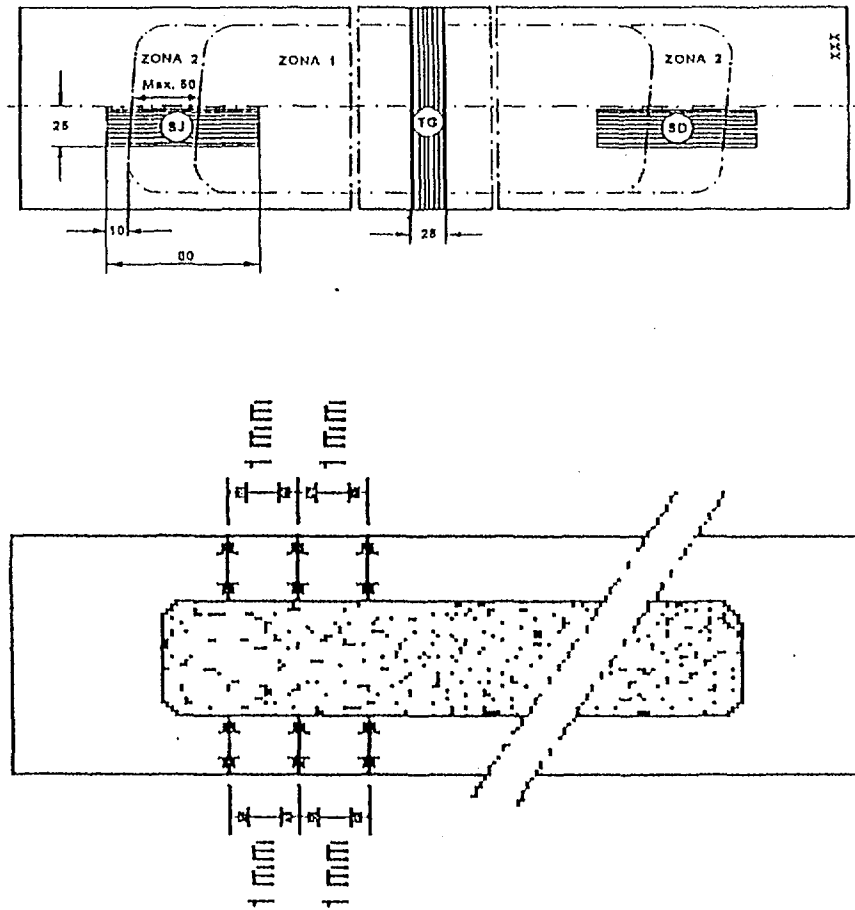


Gambar 4. Paket Rol PEB Mini.



1. meat (bahan bakar U_3Si_2-Al)
2. Kelongsong AlMg2

Gambar 5. Hasil Uji Radiografi PEB mini.



Gambar 6. Pengambilan Sampel Uji Tebal Kelongsong PEB.