

PERCOBAAN PEMBUATAN PELAT ELEMEN BAKAR (PEB) U_3Si_2 -Al TINGKAT MUAT URANIUM 4,8 DAN 5,2 g/cm^3 DENGAN PENGAYAAN 19,89 % U-235 UNTUK SAMPEL UJI IRADIASI

Supardjo**, H. Nasution*, A. Rojak**
B.G. Susanto***, Boybul***, dan E.P. Hastuti ****

*PT BATAN Teknologi

**Staf P2TBDU - BATAN yang diperbantukan
di PT BATAN Teknologi (Persero)

***P2TBDU - BATAN

****P2TRR - BATAN

ABSTRAK — PERCOBAAN PEMBUATAN PELAT ELEMEN BAKAR (PEB) U_3Si_2 -Al TINGKAT MUAT URANIUM 4,8 DAN 5,2 g/cm^3 DENGAN PENGAYAAN 19,89 % U-235 UNTUK SAMPEL UJI IRADIASI. Telah dilakukan pembuatan PEB U_3Si_2 -Al tingkat muat uranium 4,80 dan 5,20 g/cm^3 dalam rangka pengembangan produk bahan bakar U_3Si_2 -Al tingkat muat uranium 2,96 g/cm^3 yang saat ini diproduksi di PT BATAN Teknologi (persero). Sepuluh buah sampel PEB U_3Si_2 -Al pengayaan uranium 19,89 % U-235 masing-masing terdiri dari 5 PEB tingkat muat uranium 4,80 g/cm^3 dan 5 PEB tingkat muat uranium 5,20 g/cm^3 difabrikasi menggunakan fasilitas Instalasi Produksi Elemen Bakar Reaktor Riset (IPEBRR). Prosedur pembuatan sama seperti prosedur produksi U_3Si_2 -Al tingkat muat uranium 2,96 g/cm^3 dan pengujian mengacu spesifikasi Elemen Bakar RSG-GAS. Hasil uji yang meliputi: dimensi PEB dan *meat*, posisi *meat* dalam PEB, ikatan metalurgi antara kelongsong dan *meat* bahan bakar, distribusi uranium dalam *meat* dan tebal kelongsong diperoleh data yang semuanya memenuhi spesifikasi. Dari data pengujian disimpulkan bahwa PEB U_3Si_2 -Al tingkat muat uranium 4,80 dan 5,20 g/cm^3 dapat diproduksi menggunakan fasilitas IPEBRR dengan kualitas produk sesuai spesifikasi.

ABSTRACT — THE EXPERIMENTAL PRODUCTION OF U_3Si_2 -Al FUEL ELEMENT PLATES FOR 4.8 AND 5.2 g/cm^3 URANIUM LOADING WITH AN ENRICHMENT OF 19.89 % U-235 FOR THE IRRADIATION TEST SAMPLES. U_3Si_2 -Al fuel element plates with uranium loading of 4.8 and 5.2 g/cm^3 are produced to upgrade the same kind of reactor fuel element plates whose uranium loading is 2.96 g/cm^3 currently fabricated by PT Batan Teknologi (Persero). There are ten samples of U_3Si_2 -Al fuel element plates with an enrichment of 19.89 % U-235. Out of those samples, five of them have uranium loading of 4.8 g/cm^3 and the other five samples have uranium loading of 5.2 g/cm^3 . All of those fuel element plates are produced in the Research Reactor Fuel Element Production Installation in Serpong. The production procedure is the same as the one for 2.96 g/cm^3 uranium loading. The benchmark for the tests is RSG-GAS Reactor's fuel element. The data obtained from the tests are dimensions of the fuel plate and the *meat*, *meat* position in the fuel plates, metallurgical cohesiveness between the cladding and the *meat*, uranium distribution in the *meat*, and cladding thickness. All data values are in accordance with the specification of the reactor's fuel element. It is concluded that U_3Si_2 -Al fuel element plates with uranium loading of 4.8 and 5.2 g/cm^3 and an enrichment of 19.89 % U-235 can be produced in the Research Reactor Fuel Element Production Installation.

I. PENDAHULUAN

Bahan bakar nuklir merupakan komponen utama beroperasinya reaktor nuklir, baik pada Reaktor Daya maupun Reaktor Penelitian. Sebagai bahan strategis dalam teknologi nuklir, penelitian dan pengembangan di dunia terus dilakukan guna mendapatkan bahan bakar nuklir yang ekonomis dan aman bagi kehidupan manusia. Pada awalnya reaktor penelitian menggunakan bahan bakar nuklir dengan pengayaan isotop U-235 tinggi (> 90 %), dalam bentuk paduan uranium atau uranium oksida. Penggunaan uranium pengayaan tinggi sangat menguntungkan karena fabrikasinya mudah dilakukan, namun sangat mudah digunakan untuk senjata nuklir. Untuk menghindari penyalahgunaan bahan tersebut, maka masyarakat nuklir dunia terutama negara-negara yang memiliki reaktor riset sepakat untuk melakukan penelitian dan pengembangan bahan bakar reaktor penelitian dengan agenda selaras program Reduced Enrichment Research and Test Reactor (RERTR) yaitu mengubah penggunaan bahan bakar dari pengayaan uranium tinggi > 90 % U-235 ke pengayaan rendah < 20 % U-235 tanpa mengubah disain bahan bakarnya^[3]. Konsekuensi penggunaan bahan bakar pengayaan uranium rendah (pada volume tetap) berdampak pada penurunan jumlah U-235 di dalam PEB yang besarnya hampir lima kalinya. Oleh karena itu, untuk mengkompensasi penurunan U-235 perlu dipilih material bahan bakar baru yang memiliki berat jenis tinggi. Untuk memenuhi hal tersebut material yang cocok dan merupakan alternatif untuk digunakan sebagai bahan bakar pengayaan rendah adalah paduan uranium.

Instalasi Produksi Elemen Bakar Reaktor Riset (IPEBRR) yang merupakan Laboratorium Penunjang RSG-BATAN, dibangun di Kawasan Puspiptek Serpong didisain untuk memproduksi Elemen Bakar dan Elemen Kendali untuk Reaktor Riset tipe Material Testing Reactors (MTR). Elemen Bakar dan Elemen Kendali masing-masing tersusun dari 21 dan 15 PEB, yang setiap PEB berisi bahan bakar dispersi U_3O_8 -Al atau UAl_x -Al. Perbandingan berat serbuk bahan bakar dengan matriks Aluminium sangat tergantung dari tingkat muat uraniumnya. Makin tinggi tingkat muat uranium di dalam bahan bakar, jumlah bahan bakar bertambah banyak, sedangkan jumlah matriksnya semakin sedikit.

Pada tanggal 24 Mei 1996 pengelolaan IPEBRR dialihkan kepada PT. BATAN Teknologi (persero), dan sejak dioperasikan tahun 1987 hingga saat ini telah berhasil memproduksi 164 EB

dan 35 EK U_3O_8 -Al serta 89 EB dan 16 EK U_3Si_2 -Al dengan tingkat muat uranium $\pm 2,96 \text{ g/cm}^3$ ^[1]. Penggunaan kedua jenis produk EB dan EK tersebut hingga saat ini masih sebatas pemenuhan kebutuhan bahan bakar Reaktor Serba Guna-GA. Siwabessy (RSG-GAS), sedang upaya ekspor keluar negeri masih dalam proses. Untuk mengantisipasi agar mampu bersaing dengan produsen luar negeri, maka salah satu upaya yang harus dilakukan adalah penelitian dan pengembangan hingga diperoleh produk baru yang memiliki kualitas sesuai keinginan pelanggan.

Dengan tersedianya fasilitas fabrikasi Elemen Bakar Reaktor Riset tipe MTR, RSG-GAS dan Fasilitas Uji Pasca Iradiasi dan kesiapan Sumber Daya Manusia yang berpengalaman, maka penelitian dan pengembangan bahan bakar sangat mungkin untuk dilakukan. Selaras dengan pengembangan bahan bakar reaktor riset yang dicanangkan kedalam program RERTR, dan dengan telah tersedianya fasilitas fabrikasi serta pengalaman produksi bahan bakar reaktor riset, maka pengembangan produk terus dilakukan.

II. TATA KERJA DAN PERCOBAAN

A. Bahan

- Logam Uranium, pengayaan = 19,89 %, U-235
- Logam Silikon (pemadu), kadar = 99,99 %
- Serbuk Aluminium (matriks), kadar = 99,5 %
- Pelat AlMg2

B. Alat

- Instalasi Produksi Elemen Bakar Reaktor Riset (IPEBRR)

C. Langkah Kerja

Percobaan meliputi pembuatan paduan (ingot) U_3Si_2 , serbuk U_3Si_2 , Inti Elemen Bakar (IEB), pelat tutup dan pelat bingkai, Pelat Elemen Bakar (PEB), serta pengujian baik bahan baku, produk tengah maupun produk akhir (PEB) dengan tahapan pengerjaan sebagai berikut^[1,3]:

Paduan/Ingot U_3Si_2

Paduan U_3Si_2 (92,5 % U + 7,5 % Si) dibuat dengan teknik peleburan (lima kali pengulangan) dalam tungku busur listrik bermedia gas Argon.

Pengujian: strukturmikro

Serbuk U_3Si_2

Ingot U_3Si_2 hasil peleburan dibuat serbuk dengan Ring Mill dan Ball Mill di dalam Glove Box bermedia gas Argon hingga diperoleh serbuk dengan komposisi fraksi butir – 90 + 40 μm antara 75 – 85 % dan - 40 μm antara 15 – 25 %.

Pengujian: analisis kadar U dan impuritas, komposisi fasa, fraksi butir dan berat jenis

Inti elemen bakar

Serbuk bahan bakar U_3Si_2 dicampur serbuk matriks Al dengan komposisi (100,12 g U_3Si_2 + 26,78 g Al) untuk tingkat muat uranium 4,80 g/cm³ dan (108,47 g U_3Si_2 + 24,95 g Al) untuk tingkat muat uranium 5,20 g/cm³, selanjutnya masing-masing campuran (setiap tingkat muat uranium dibuat 5 buah) dipres pada tekanan 170 bar hingga terbentuk IEB U_3Si_2 dengan dimensi 100,20 x 60,35 x 3,15^{±0,05} mm.

Pengujian: dimensi, berat, kadar isotop U-235 dan distribusi kadar uranium

Pelat bingkai dan pelat tutup (kelongsong)

Pelat bingkai dan pelat tutup dibuat menggunakan bahan paduan AlMg2 dengan dimensi masing-masing 145 x 180 x 3,14^{±0,05} mm (dimensi lubang jendela 101 x 62 mm) dan 145 x 180 x 3,67^{±0,05} mm.

Pengujian: dimensi

Pelat elemen bakar

IEB dimasukkan kedalam jendela pelat bingkai dan kedua sisinya ditutup dengan pelat tutup dan keempat sisi sambungannya diikat dengan las TIG pada beberapa tempat. Selanjutnya dilakukan perolan 4 tahap pada suhu 425°C hingga dicapai ketebalan 1,65^{±0,05} mm dan dilanjutkan perolan dingin hingga ketebalan 1,40^{±0,02} mm. Pelat hasil perolan dingin dipotong dengan dimensi 625^{±0,05} x 70,75^{±0,15} mm dengan *meat* berada tepat ditengah-tengahnya. Dimensi PEB U_3Si_2 -Al dalam penelitian dibuat seperti Ditunjukkan pada Gambar 1.

Pengujian: pengamatan visual, uji blister secara visual dan ultrasonik, homogenitas uranium di dalam *meat*, tebal kelongsong, posisi *meat* dan *white point* (titik putih).

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Paduan U_3Si_2

Struktur mikro paduan/ingot U_xSi_y komposisi (92,5 % U + 7,5 % Si) hasil 5 kali pengulangan peleburan dalam tungku busur listrik bermedia gas Argon ditunjukkan Gambar 2. Pada gambar nampak bahwa senyawa U_3Si_2 dikelilingi oleh matriks USi eutektik dan senyawa atau unsur lainnya yang terdapat didaerah batas butir. Bintik-bintik yang terdapat pada butir adalah pengaruh polarisasi sinar yang sebenarnya adalah senyawa U_3Si_2 . Ingot U_3Si_2 berstruktur kristal tetragonal, yang didalam setiap sel satuannya terdapat ikatan antara atom U-Si serta ikatan rapat antara atom Si-Si. Ikatan rapat antara atom Si-Si inilah yang menyebabkan senyawa bersifat rapuh sehingga dari sisi fabrikasi sangat menguntungkan karena mudah dibuat serbuk^[4].

B. Serbuk U_3Si_2

Serbuk U_3Si_2 dibuat dengan cara mekanik yaitu menggerus ingot U_3Si_2 menggunakan Ring Mill hingga diperoleh butiran < 200 μm dan dilanjutkan dengan Ball Mill hingga diperoleh butiran serbuk < 90 μm . Pembuatan serbuk di dalam Glove Box bermedia gas Argon diperoleh serbuk cukup baik dan selama proses tidak teramati adanya percikan api, ini menunjukkan bahwa tidak terjadi reaksi oksidasi.

Data uji/analisis serbuk U_3Si_2 yang disajikan di dalam Tabel 1. menunjukkan bahwa unsur logam pengotor masih terdapat didalam serbuk U_3Si_2 , namun jumlahnya relatif kecil dan masuk dalam batas yang disyaratkan, kecuali unsur logam Al sebesar 896,00 ppm (batas maksimum 600 ppm). Walaupun demikian karena keberadaan unsur Al kemungkinan dalam bentuk senyawa UAl_x yang sebenarnya juga merupakan bahan bakar sehingga tidak menjadi masalah, terlebih total boron ekuivalen hanya 3,70598 ppm, masih lebih kecil dari yang dipersyaratkan sebesar 10 ppm. Distribusi ukuran butiran serbuk dengan komposisi –90 +40 μm = 84,26 dan –40 μm = 15,74 % serta berat jenis sebesar 12,27 g/cm³ yang keduanya memenuhi spesifikasi.

Hasil Difraksi Sinar-X serbuk U_3Si_2 (Gambar 3) menunjukkan bahwa keempat puncak tertinggi terletak pada sudut 2 θ : 27,14 °; 33,43 °; 35,71 ° dan 38,74 °, yang merupakan posisi sudut senyawa U_3Si_2 . Dengan mengamati seluruh sudut difraksi yang menghasilkan puncak-puncak difraksi tampak hampir semuanya menunjukkan senyawa

U_3Si_2 , sedangkan kemungkinan adanya senyawa lain seperti U_3Si , UO_2 , U , USi dan lain-lain cenderung jumlahnya sangat sedikit. Dari data kerapuhan ingot, berat jenis dan hasil uji dengan Difraksi Sinar-X, menunjukkan bahwa secara kualitatif paduan uranium silisida didominasi senyawa U_3Si_2 .

C. Pelat Elemen Bakar U_3Si_2 -Al

Teknik fabrikasi PEB U_3Si_2 -Al tingkat muat uranium 4,80 dan 5,20 g/cm^3 adalah sama seperti fabrikasi PEB U_3Si_2 -Al tingkat muat uranium 2,96 g/cm^3 . Perbedaannya hanya pada komposisi bahan bakar U_3Si_2 dan matriks Aluminiumnya, yaitu dengan kenaikan tingkat muat uranium, jumlah bahan bakar bertambah banyak, sedangkan jumlah matriksnya menjadi sedikit. Penentuan komposisi bahan bakar U_3Si_2 dan matriks Al pada setiap tingkat muat uranium dilakukan dengan perhitungan menggunakan data uji/analisis kadar isotop U-235, kadar U, berat jenis U_3Si_2 dan Aluminium matrik, pada volume *meat* bahan bakar tetap (= 19,23 cm^3). Hasil perhitungan komposisi campuran serbuk U_3Si_2 dan serbuk Al masing-masing 100,12 + 26,78 g untuk tingkat muat uranium 4,80 g/cm^3 dan 108,47 + 24,95 g untuk 5,20 g/cm^3 .

Setiap komposisi dipres pada tekanan 170 bar hingga terbentuk Inti Elemen Bakar (IEB) dengan ketebalan standar $3,15^{+0,05}$ mm. Data percobaan menunjukkan bahwa IEB dengan tingkat muat uranium 4,80 g/cm^3 dan 5,20 g/cm^3 pada komposisi serbuk U_3Si_2 dan serbuk Al tersebut diatas memiliki ketebalan rerata 3,145 mm. Apabila tebal IEB hasil pengepresan diluar standar, dan untuk mempertahankan agar ketebalan hasil pres (pada tekanan tetap =170 bar) sesuai spesifikasi, maka pengaturan hanya dapat dilakukan dengan cara menambah/mengurangi serbuk matriks Aluminium tanpa merubah jumlah bahan bakarnya. Produk Pelat Elemen Bakar (PEB) U_3Si_2 -Al muatan uranium 4,80 dan 5,20 g/cm^3 hasil proses pengerolan pada suhu 425 °C terjadi ikatan metalurgi yang cukup baik antara *meat* dengan kelongsong maupun kelongsong dan kelongsong. Hal ini terbukti dari pengamatan secara visual dan hasil uji ultrasonik yang menggunakan standar terkecil (0,5 mm) terhadap seluruh PEB tidak teramati adanya lepuhan (*blister*). Ini menunjukkan bahwa pemanasan serbuk U_3Si_2 dan aluminium pada suhu 180 °C selama 3,50 jam serta IEB pada suhu 450 °C selama 3,50 jam cukup untuk mengusir uap air yang terdapat dalam serbuk maupun IEB.

Pada proses pengerolan terjadi aliran material campuran bahan bakar U_3Si_2 dan serbuk aluminium bersama-sama. Untuk bahan bakar dengan tingkat muat uranium rendah ketebalan *meat* disepanjang PEB hampir sama. Dengan kenaikan tingkat muat uranium, jumlah bahan bakar U_3Si_2 bertambah banyak sedang jumlah matriks aluminium turun yang mengakibatkan pada proses pengerolan aliran material menjadi diskontinyu, sehingga terjadi penumpukan bahan bakar diujung PEB. Sampel uji tebal kelongsong PEB diambil sesuai Gambar 4, diperoleh data yang ditampilkan pada Tabel 2. Dari ketiga posisi pengambilan sampel (SJ: sisi jauh, TG: tengah dan SD: sisi dekat) terhadap PEB tingkat muat uranium 4,8 maupun 5,20 g/cm^3 memiliki ketebalan yang hampir sama. Akan tetapi pada ujung PEB tingkat muat uranium 4,8 g/cm^3 terdapat tebal minimum 0,277 mm pada posisi SD, dan 0,272 mm pada posisi SJ untuk tingkat muat uranium 5,20 g/cm^3 . Berdasarkan pada spesifikasi, tebal kelongsong tersebut masih memenuhi kriteria yang dipersyaratkan karena batas tebal kelongsong minimum yang diijinkan adalah 0,25 mm.

Homogenitas uranium di dalam *meat* PEB diuji dengan Attenuasi Sinar-X dan diperoleh hasil seperti ditunjukkan pada Gambar 5. Tingkat homogenitas ditentukan dengan menghitung simpangan puncak tertinggi dari standar nominalnya, dan diperoleh bahwa simpangan maksimum untuk PEB U_3Si_2 -Al tingkat muat uranium 4,80 dan 5,20 g/cm^3 masing-masing adalah 6,30 dan 6,90 %. Simpangan tersebut masih jauh dibawah batas simpangan maksimum yang diijinkan yaitu sebesar 20 %, sehingga homogenitas kedua tingkat muat uranium tersebut sesuai dengan spesifikasi.

Data uji PEB dengan radiografi Sinar-X direkam kedalam film dan diamati pada posisi sesuai Gambar 6. dan data uji dituangkan pada Tabel 3. Posisi dan geometri *meat* terhadap seluruh PEB cukup baik dengan kelengkungan maksimum untuk kedua tingkat muat uranium 0,9 mm, jarak antara sisi *meat* terluar dan sisi luar PEB masih dalam kisaran antara 2,8–5,2 mm. Ujung *meat* untuk semua PEB nampak mempunyai kecenderungan sama yaitu bentuk E dan tidak teramati adanya titik putih diluar *meat*.

Dilihat dari seluruh data uji menunjukkan bahwa kualitas PEB U_3Si_2 -Al kedua tingkat muat uranium memenuhi spesifikasi, sedangkan untuk mengetahui unjuk kerjanya di dalam reaktor akan segera dilakukan uji iradiasi menggunakan fasilitas seperti ditunjukkan pada Gambar 7 dan Gambar 8.

IV. KESIMPULAN

Data uji terhadap PEB U_3Si_2 -Al dengan tingkat muat uranium 4,8 dan 5,2 g/cm³ menunjukkan bahwa semuanya sesuai spesifikasi Elemen Bakar RSG-GAS. Dengan demikian memberikan keyakinan bahwa PEB U_3Si_2 -Al dengan tingkat muat uranium 4,8 dan 5,2 g/cm³ dapat diproduksi menggunakan fasilitas IPEBRR.

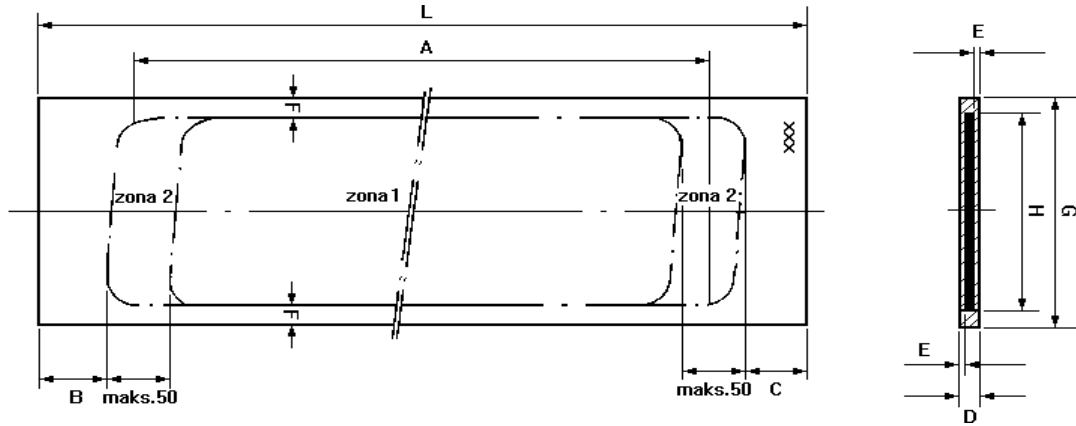
UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada seluruh karyawan Divisi Produksi Elemen Bakar Nuklir, PT.BATAN Teknologi (persero) yang telah berkenan membantu penelitian hingga selesainya tulisan ini.

DAFTAR ACUAN

- [1] DIVISI PRODUKSI EBN, "Produksi elemen bakar U_3O_8 -Al dan U_3Si_2 -Al dengan tingkat muat Uranium 2,96 g/cm³".
- [2] NUKEM GmbH, "Discription of the Nukem Quality Control Of Fuel Element Fabrication", Part 3, 1982.
- [3] HOFMAN, G.L and SNELGROVE, J.L, "Discription Fuels", ANL, 1994.
- [4] SUPARDJO, "Karakterisasi Paduan U_xSi_y pada Daerah Komposisi antara 6,62 s/d 7,63 % Si", Thesis Magister, Program Pasca sarjana, Institut Teknologi Bandung, 1993.
- [5] SUPARDJO, "Penentuan Homogenitas Distribusi Uranium Di dalam Pelat Elemen bakar U_3Si_2 -Al muatan uranium 4,80 dan 5,20 g/cm³ dengan attenuasi Sinar-X", Prossiding Presentasi ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir V, P2TBDU & P2BGN – BATAN Jakarta, 22 Februari 2000.
- [6] SUPARDJO, "Permasalahan Fabrikasi Bahan Bakar U_3Si_2 -Al Dengan Tingkat Muat Uranium Tinggi", Prossiding Presentasi ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir PEBN-BATAN Jakarta, 18-19 Maret 1996.
- [7] "Standardization of spesification and Inspection for LEU Plate Type Research Reactors", IAEA-TECdoc-467, Vienna, 1988.
- [8] Spesifikasi Elemen Bakar RSG-GAS.

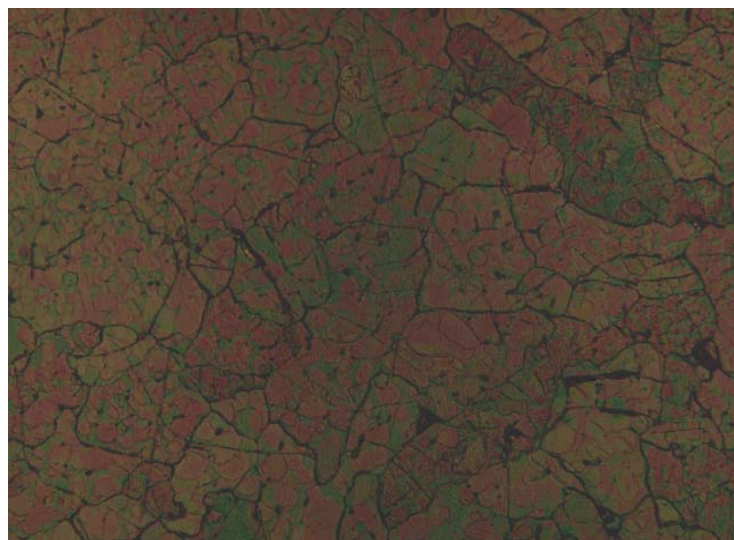
LAMPIRAN



Gambar 1. Dimensi PEB U_3Si_2 -Al (satuan: mm)

KETERANGAN GAMBAR:

	Nominal, mm	Dimensi	Nominal, mm
L	$625^{±0,2}$	E	Zona 1 dan 2 min 0,25 dan rerata $0,38^{+0,05}_{-0,08}$
G	$70,75^{±0,15}$	A	Min. 570
H	Min 60,35	B atau C	7,5 – 17,5
D	$1,3^{±0,07}$	F	2,8-5,2



100 μ m

Gambar 2. Strukturmikro paduan U_3Si_2

TABEL 1. HASIL ANALISIS SERBUK U_3Si_2

Kadar Uranium = 92,19 %
 Kadar isotop U-235 = 19,89 %

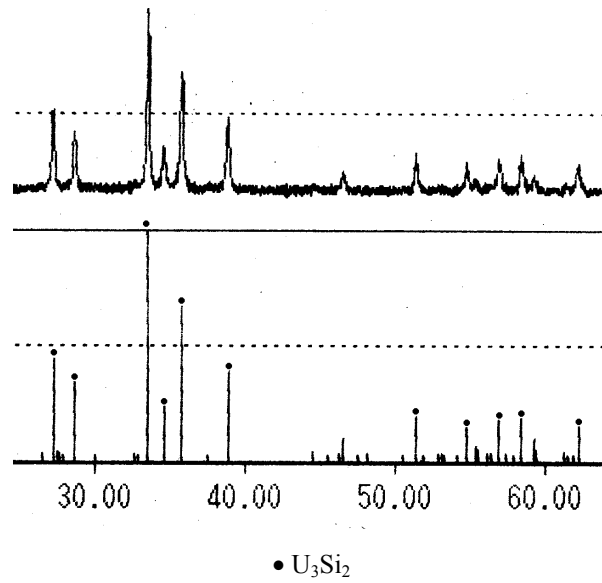
a. Kandungan pengotor/impuritas

Unsur	Maksimum, ppm	Aktual, ppm	Faktor Boron Ekuivalen	Boron Ekuivalen, ppm
Al	600,0	96,00	0,00012	0,10752
B	4,0	3,00	1,00000	3,00000
Ca	100,0	6,97	0,00016	0,00272
Cd	2,0	ttd	0,31044	0
Cu	80,0	5,80	0,00085	0,05593
Co	10,0	ttd	0,00899	0
Li	10,0	ttd	0,14507	0
Zn	1000,0	9,95	0,00024	0,00239
Mg	50,0	ttd	0,00004	0
Mn	5,0	ttd	0,00345	0
Fe	*)	473,54	0,00065	0,30780
Ni	*)	214,60	0,00107	0,22962
Fe* + Ni*	1000,0	688,14		
			Total	3,70598

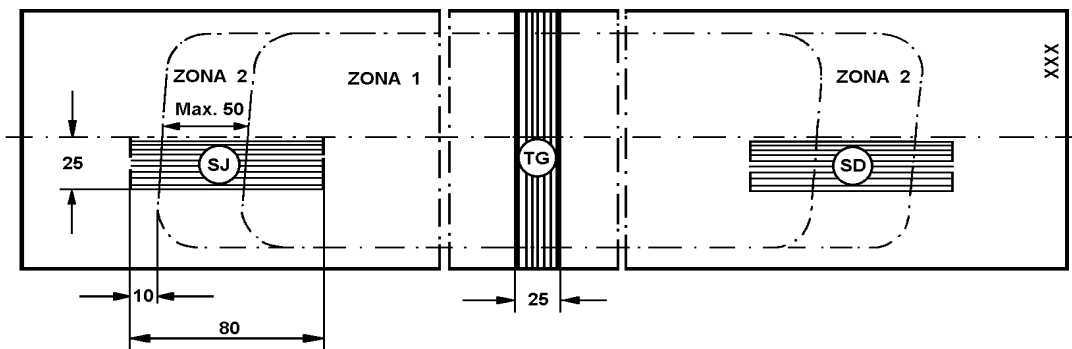
b. Distribusi ukuran serbuk U_3Si_2

c. Densitas serbuk U_3Si_2

Ukuran, μm	Nominal, %	Aktual, %	Nominal, g/cm^3	Aktual, g/cm^3
- 90 + 40	75 - 85	84,26	12,20 $\pm 0,50$	12,27
- 40	15 - 25	15,74		



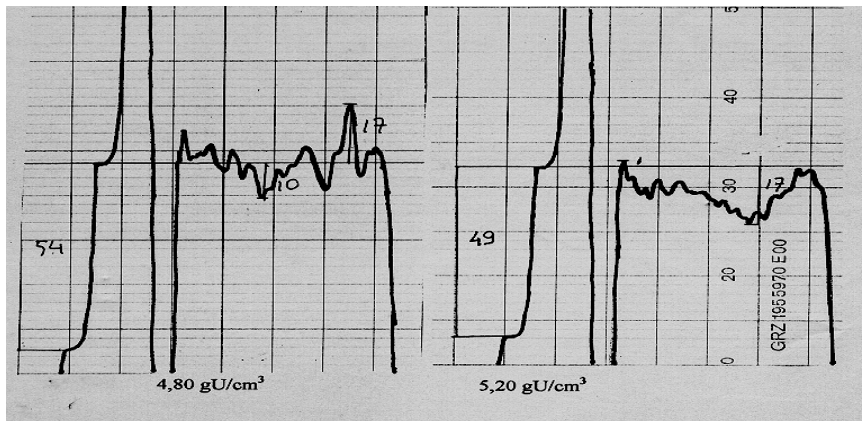
Gambar 3. Hasil uji serbuk U_3Si_2 dengan difraksi sinar-X



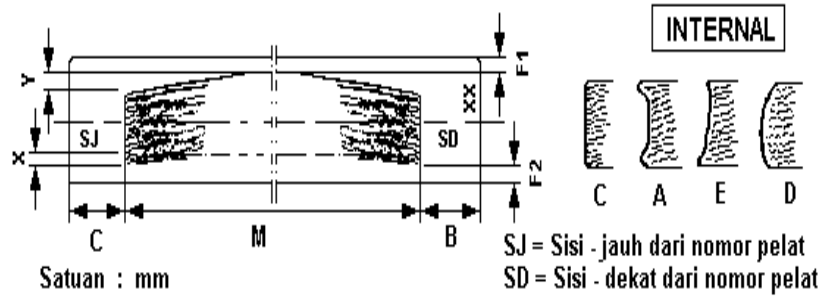
Gambar 4. Posisi Pengambilan sampel uji tebal kelongsong

TABEL 2. DATA PENGUKURAN TEBAL KELONGSONG

No.	PEB U_3Si_2 - Al t.m.u g/cm^3	S J		T G		S D	
		Min	X rata-rata	Min	X rata-rata	Min	X rata-rata
1	4,80	0,285	0,440	0,368	0,434	0,277	0,412
		0,292	0,447	0,385	0,443	0,316	0,424
2	5,20	0,272	0,411	0,372	0,423	0,359	0,421
		0,306	0,418	0,378	0,433	,379	0,433



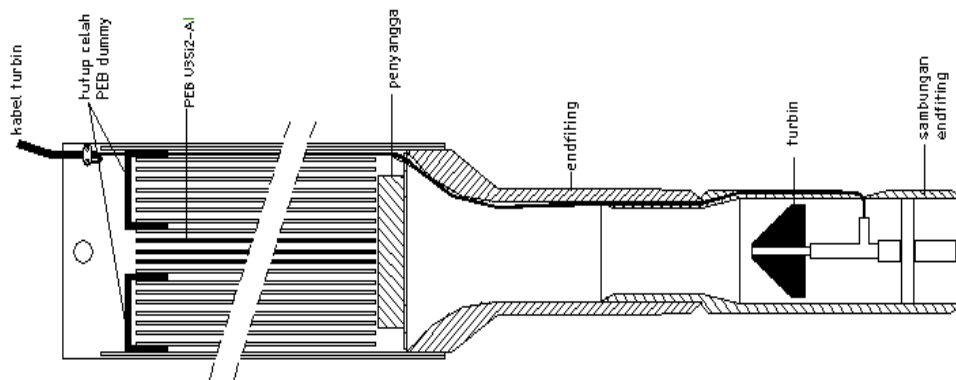
Gambar 5. Distribusi uranium di dalam PEB U_3Si_2-Al



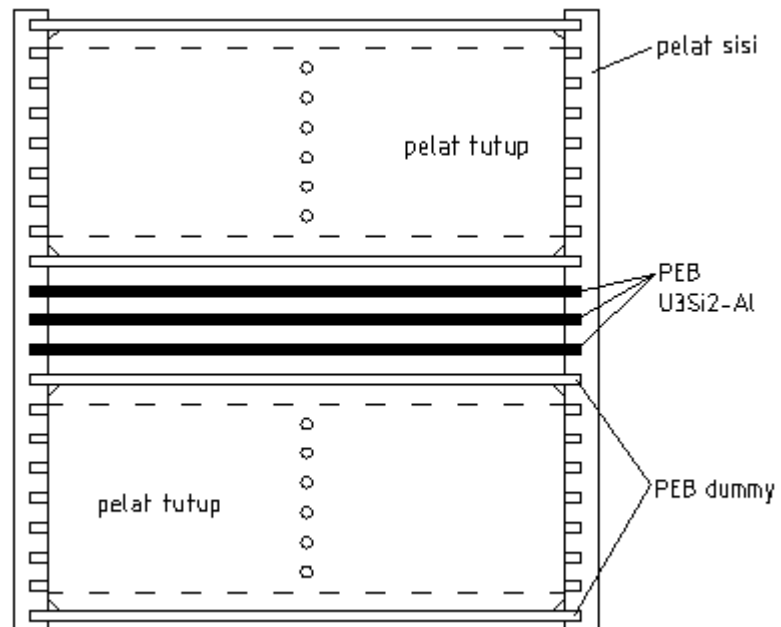
Gambar 6. Pengamatan film radiografi untuk PEB U_3Si_2-Al

TABEL 3. DATA PENGAMATAN FILM RADIOGRAFI UNTUK PEB U_3Si_2-Al

No	PEB U_3Si_2-Al t.m.u, g/cm^3	Meat (mm)		F1 mm	F2 mm	B mm	C mm	Bentuk Meat		Kelengkungan		White Point	Ket
		Pj. Maks	Lb. Maks					SJ	SD	X	Y		
1	4,80	599	62,7	3,8	4,1	32,5	61,0	E	E	0,8	0,9	Tidak ada	Baik
2	4,80	598	62,3	4,0	4,3	33,8	59,7	E	E	0,5	0,5	Tidak ada	Baik
3	4,80	602	62,4	4,0	4,2	31,8	58,4	E	E	0,2	0,2	Tidak ada	Baik
4	4,80	604	62,4	4,0	4,1	30,0	57,2	E	E	0,2	0,2	Tidak ada	Baik
5	5,20	599	62,5	3,7	4,1	33,5	60,0	E	E	0,5	0,5	Tidak ada	Baik
6	5,20	601	62,5	3,9	4,2	31,5	58,2	E	E	0,2	0,3	Tidak ada	Baik
7	5,20	602	62,5	3,8	4,1	31,2	58,5	E	E	0,2	0,2	Tidak ada	Baik
8	5,20	599	62,5	3,8	4,2	33,8	60,2	E	E	0,9	0,9	Tidak ada	Baik



Gambar 7. Elemen bakar dummy untuk uji iradiasi PEB



Gambar 8. Irisan atas elemen bakar dummy