



ID0200126

## PENENTUAN HOMOGENITAS DISTRIBUSI URANIUM DI DALAM PELAT ELEMEN BAKAR $U_3Si_2$ -Al MUATAN URANIUM 4,80 DAN 5,20 $g/cm^3$ DENGAN ATENUASI SINAR-X

Supardjo, Abdul Rojak, Boybul, Suyoto, dan Arca Datam S.  
PUSAT TEKNOLOGI BAHAN BAKAR NUKLIR DAN DAUR ULANG - BATAN

### ABSTRAK

PENENTUAN HOMOGENITAS DISTRIBUSI URANIUM DI DALAM PELAT ELEMEN BAKAR  $U_3Si_2$ -Al MUATAN URANIUM 4,80 DAN 5,20  $g/cm^3$  DENGAN ATENUASI SINAR-X. Kalibrasi pengukuran intensitas Sinar-X terhadap Pelat Elemen Bakar (PEB)  $U_3Si_2$ -Al muatan uranium antara 3,60 s.d. 5,20  $g/cm^3$  dan balok AlMgSi dengan variasi ketebalan telah dilakukan. Pengukuran dengan mengubah parameter diameter slit dan daya atenuasi Sinar-X, diperoleh intensitas Sinar-X cukup representative dengan menggunakan diameter slit 18 mm dan daya 43 kV. Dari grafik hubungan Intensitas Sinar-X vs variasi muatan uranium di dalam PEB dan tebal material AlMgSi1, kesepadanan tebal balok AlMgSi terhadap muatan uranium di dalam PEB dapat ditentukan. Dengan asumsi toleransi pengukuran homogenitas  $\pm 20\%$  dari nominal, maka ketebalan undakan standar AlMgSi1 dapat ditentukan dan selanjutnya bersama-sama dengan PEB diskening untuk menentukan homogenitas uraniumnya. Hasil pengujian PEB  $U_3Si_2$ -Al dengan muatan uranium 4,80, dan 5,20  $g/cm^3$  (masing-masing 4 buah) diperoleh bahwa distribusi uranium di dalam meat PEB cukup homogen, dengan penyimpangan maksimum masing-masing sebesar 6,30 % dan 6,90 %. Data pengujian menunjukkan bahwa pengukuran cukup baik, mudah, dan cepat sehingga metode ini cocok untuk uji kualitas homogenitas uranium didalam PEB.

### ABSTRACT

THE DETERMINATION OF URANIUM DISTRIBUTION HOMOGENEITY IN THE FUEL PLATES WITH THE URANIUM LOADING OF 4.80 AND 5.20  $g/cm^3$  BY X-RAY ATTENUATION. The calibration of X-Ray intensity of the  $U_3Si_2$ -Al fuel plates with the uranium loading between 3.60 up to 5.20  $g/cm^3$  and varied thickness of AlMgSi1 reference block have been performed. The measurement with changing variable slit diameter and energy of X-Ray attenuation, are produced enough representative X-Ray intensity at 18 mm slit diameter and energy of 43 kV. From the correlation of X-ray intensities vs variation of uranium loading in the fuel plates and thickness of the AlMgSi1 materials, the equivalence of thickness of the AlMgSi1 block to the uranium loading of fuel plates are determined. By assuming that the tolerance of the homogeneity measurement is  $\pm 20\%$  from normal thickness staircase of the AlMgSi1 standard could be determined and then together with fuel plate were scanned to determine the uranium homogeneity. The test result on the  $U_3Si_2$ -Al fuel plates with uranium loading of 4.80 and 5.20  $g/cm^3$  (each 4 fuel plates) indicated that uranium distribution in the fuel plates is relatively homogeneous, with each maximum deviation being 6.30 % and 6.90 %. It is showed that measurement method is relatively good, easy, and fast so that this method is suitable to control the uranium homogeneity in the fuel plate.

### PENDAHULUAN

Bahan bakar dispersi tipe pelat telah dikenal dan mulai digunakan sebagai bahan bakar reaktor tipe *Material Testing Reactors* (MTR) sejak tahun 1950-an. Pada waktu itu bahan bakar yang digunakan adalah  $UAl_x$  dengan perkayaan uranium tinggi ( $\geq 90\%$  U-235) yang didispersikan secara kontinyu kedalam logam matriks Al<sup>[1]</sup>.

Sesuai himbauan masyarakat nuklir international bahwa seluruh reaktor penelitian di dunia yang menggunakan bahan bakar perkayaan uranium tinggi agar diganti

dengan uranium perkayaan rendah ( $\leq 20\%$  U-235) seperti yang dicanangkan dalam program *Reduced Enrichment Research and Test Reactors* (RERTR), maka upaya untuk kompensasi penurunan reaktivitas teras reaktor akibat penurunan perkayaan uranium terus dilakukan. Salah satu alternatif untuk kompensasi penurunan perkayaan uranium tanpa mengubah disain teras reaktor adalah menggunakan bahan bakar baru yang memiliki densitas tinggi, sehingga muatan uranium di dalam bahan bakar dapat ditingkatkan. Sehubungan dengan pengembangan bahan bakar baru tersebut, maka perlu penerapan metode pengujian

yang tepat sesuai persyaratan uji bahan bakar.

Bahan bakar nuklir merupakan komponen utama suatu reaktor nuklir. Selama reaktor beroperasi, terjadi reaksi fisi dan menghasilkan panas yang distribusinya sangat tergantung homogenitas bahan fisilnya. Untuk bahan bakar dispersi tipe pelat, inti elemen bakar (IEB) dibuat dengan cara pengepresan pada tekanan tinggi terhadap campuran bahan bakar dengan serbuk matriks. Inti elemen bakar hasil pengepresan dibungkus pelat kelong-song paduan aluminium, dan selanjutnya dibentuk menjadi pelat elemen bakar (PEB) dengan teknik perolan. Pelat elemen bakar hasil perolan berbentuk memanjang dengan IEB (IEB di dalam PEB biasa disebut *meat*) berada tepat ditengah-tengahnya. Dalam kondisi ideal, uranium di dalam bahan bakar dispersi tersebar merata dengan dikelilingi oleh serbuk logam matriks seperti ditunjukkan pada Gambar 1<sup>[1,2]</sup>. Pada kenyataannya distribusi uranium yang ideal sulit diperoleh karena selalu terjadi ketidakhomogenan. Oleh karena itu, batasan tingkat homogenitas uranium di dalam *meat* PEB perlu ditetapkan sesuai disain analisis kesela-matannya. Ketidakhomogenan uranium di dalam *meat* PEB di luar batas disain akan menyebabkan distribusi panas tidak merata dan dapat menyebabkan kerusakan PEB, karena meleleh dan terjadi stres bahan akibat perbedaan suhu. Untuk menghindari kerusakan PEB akibat iradiasi, maka pengujian homogenitas uranium di dalam *meat* PEB secara tepat mutlak perlu dilakukan sebelum dirakit menjadi elemen bakar.

Beberapa metode pengujian homogenitas uranium di dalam *meat* PEB secara *Non Destructive Test* (NDT) dapat dilakukan di antaranya dengan *Radio-graphy*, *Autoradiography*, *Gamma Counting*, dan atenuasi sinar-X<sup>[3]</sup>. Pengujian homogenitas uranium di dalam *meat* PEB U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>-Al muatan uranium 2,96 g/cm<sup>3</sup> dengan atenuasi sinar-X telah rutin dilakukan dalam mendukung produksi elemen bakar di PT. BATAN *Teknologi* (Persero), tetapi kondisi operasi dan undakan standarnya tidak dapat digunakan untuk pengujian homogenitas uranium di dalam *meat* PEB dengan jenis bahan bakar dan muatan yang berbeda<sup>[4]</sup>. Sejalan dengan penelitian bahan bakar U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>-Al muatan uranium di atas 2,96 g/cm<sup>3</sup>

yang saat ini sedang dilakukan di BATAN dan PT. BATAN *Teknologi* (Persero), maka kondisi pengujian homogenitas uranium di dalam *meat* PEB secara tepat perlu diteliti.

Homogenitas uranium di dalam *meat* PEB pada metode ini dapat diketahui dengan mencatat tingkat atenuasi berkas sinar-X yang dilewatkan melalui PEB yang diuji. Untuk maksud ini digunakan berkas sinar-X yang terkolimasi dengan baik dengan energi cukup rendah. *Scanning* sinar-X secara transmisi ini digunakan untuk mengevaluasi homogenitas uranium di dalam *meat* PEB. Metode ini memungkinkan digunakan dalam pengujian homogenitas secara kuantitatif terhadap tingkat muat uranium di dalam *meat* termasuk di daerah *dogbones* tanpa merusak PEB yang diuji. Dengan menggunakan standar kalibrasi yang tepat, maka akan diperoleh hasil ukur yang baik, dengan tingkat penyimpangan sekecil mungkin.<sup>[5]</sup>

Secara kuantitatif hubungan perubahan konsentrasi bahan bakar dengan intensitas sinar-X yang ditransmisikan melalui spesimen dapat dilukiskan dengan persamaan 1.

$$I = I_0 e^{-(\mu/\rho) \rho x} \quad (1)$$

Keterangan:

I = intensitas yang ditransmisikan

I<sub>0</sub> = intensitas awal

μ = koefisien absorpsi, cm<sup>-1</sup>

ρ = berat jenis bahan, g/cm<sup>3</sup>

x = tebal absorber, cm

Koefisien absorpsi naik sesuai dengan kenaikan nomor atom absorber/spesimen dan biasanya menurun dengan kenaikan energi sinar-X.<sup>[3,6]</sup> Dalam metode ini pengaruh atenuasi dari matriks Al dan kelongsong paduan Al yang tebalnya cukup dominan dapat diabaikan terhadap atenuasi efektif uraniumnya karena bilangan μ logam Al sangat kecil dibandingkan dengan bilangan μ uranium. Kelakuan atenuasi sinar-X pada uranium di dalam *meat* dapat disimulasikan dengan sebuah balok paduan Al sedemikian sehingga atenuasi pada tingkat muat uranium kira-kira sama dengan atenuasi sinar-X pada balok bahan AlMgSi1 tersebut. Untuk menentukan dapat berlanjut atau tidaknya pengujian dari standar suatu bahan digunakan material standar AlMgSi<sub>1</sub> dengan pertimbangan tingkat homogenitasnya cukup baik dan mudah

dibentuk. Dari ketebalan paduan Al yang bervariasi dicatat atenuasinya, kemudian dibuat grafik hubungan tebal dan transmitansinya pada kondisi yang sesuai.<sup>[3,4]</sup> Dengan demikian, sebuah undakan Al dapat dibuat untuk memberikan gambaran distribusi uranium di dalam *meat* yaitu pada daerah  $\pm 20\%$  dari nominalnya.<sup>[4]</sup> Kemudian dengan menyertakan undakan standar itu pada setiap pengukuran PEB, dapat diketahui distribusi U untuk nilai yang dispesifikasikan yang diwakili undakan standar tersebut. Variasi sejumlah bahan dengan nomor atom tinggi (uranium) akan mengubah intensitas radiasi yang diteruskan. Teknik kalibrasi dilakukan dengan menghubungkan perubahan intensitas radiasi yang diteruskan dengan perubahan muatan uranium di dalam bahan bakar dan variasi ketebalan pelat aluminium.

Dari hasil penelitian ini diharapkan diperoleh data undakan standar yang dapat digunakan sebagai acuan untuk pengukuran homogenitas uranium di dalam *meat* PEB dari berbagai jenis bahan bakar dan muatan uranium sesuai pengembangan bahan bakar dispersi di masa mendatang.

## TATA KERJA

### Bahan:

1. Serbuk  $U_3Si_2$ -Al dengan perkayaan U-235 sebesar 19,89 %
2. Serbuk Al dengan kemurnian 99,99 %
3. Pelat AlMg2
4. Pelat AlMgSi1

### Alat :

1. Timbangan analitik
2. Mesin Pres
3. Mesin Rol
4. Atenuasi Sinar-X

### Pembuatan PEB:

Serbuk  $U_3Si_2$  dengan perkayaan U-235 sebesar 19,89 % dan serbuk matriks Al dicampur dengan perbandingan berat sesuai dengan muatan uranium berturut-turut 3,60; 4,20; 4,80 dan 5,20  $g/cm^3$  (Tabel 1), kemudian setiap hasil campuran dibentuk menjadi inti elemen bakar (IEB) dengan pengepresan pada tekanan 170 bar<sup>[7]</sup>. IEB hasil pres dibungkus dengan pelat AlMg2 (sebagai kelongsong), dibentuk PEB dengan teknik perolan panas pada suhu  $\pm 425^\circ C$

dan perolan dingin beberapa tahap hingga diperoleh ketebalan akhir  $\pm 1,4$  mm. Setelah melalui proses pelurusan kemudian dikenai proses pemotongan hingga diperoleh dimensi PEB seperti Gambar 2, dan siap dikenai uji homogenitas dengan atenuasi sinar-X.

### Menentukan kondisi optimum atenuasi sinar-X:

PEB dengan 3,60; 4,20; 4,80 dan 5,20  $g/cm^3$  diskaning menggunakan Atenuasi sinar X (dengan parameter diameter *slit*/celah dan daya) untuk mendapatkan daerah intensitas serapan sinar-X yang spesifik. Kondisi optimum pada pengukuran tersebut, selanjutnya digunakan untuk pengukuran intensitas serapan sinar-X terhadap balok AlMgSi1 dengan variasi ketebalan. Selanjutnya dibuat grafik hubungan antara intensitas serapan sinar-X dengan variasi pemuatan uranium di dalam PEB dan variasi tebal balok. Dari grafik tersebut dapat ditentukan equivalensinya antara muatan dengan tebal balok pada intensitas yang sama. Dengan demikian ketebalan undakan balok standar dapat dibuat sesuai dengan muatan uranium PEB yang akan ditentukan homogenitasnya.

### Pengujian homogenitas PEB:

Pengujian homogenitas dilakukan dengan cara PEB yang akan diuji diskaning bersama balok undakan standar menggunakan slit 18 mm dan daya sebesar 43 kV. Data uji berupa gambar, dianalisis dengan melakukan pengukuran untuk menghitung simpangannya.

## HASIL DAN BAHASAN

### a. Preparasi sampel:

Bahan baku yang digunakan pada penelitian ini adalah serbuk bahan bakar  $U_3Si_2$  perkayaan 19,89% U-235 dan bahan matriks berupa serbuk Al. Dari hasil analisis kimia/pengujian terhadap serbuk  $U_3Si_2$  diperoleh kadar uranium sebesar 92,29 % dengan unsur-unsur logam penyerta (Tabel 2), berat jenis 12,27  $g/cm^3$ , dan fraksi butir berukuran  $-90 + 40 \mu m = 84,76\%$  dan  $-40 \mu m = 15,74\%$ . Serbuk matriks Al berkadar 99,99 % dengan unsur logam penyerta (Tabel 3), berat jenis 2,70  $g/cm^3$ , dan diameter butir serbuk berukuran  $< 10 \mu m$ .

Perhitungan boron equivalen berdasar unsur-unsur logam penyerta di dalam serbuk  $U_3Si_2$  diperoleh sebesar 3,70 ppm yang masih lebih rendah dari batas yang diijinkan yaitu sebesar 10 ppm. Dari hasil analisis/pengujian serbuk  $U_3Si_2$  dan serbuk Al tersebut, menunjukkan bahwa keduanya telah memenuhi persyaratan bahan bakar. Data kekayaan U-235, kadar U, berat jenis  $U_3Si_2$  dan Al harus diketahui secara tepat, karena selain untuk memenuhi spesifikasi juga digunakan sebagai dasar perhitungan pembuatan bahan bakar dengan pemuatan uranium yang bervariasi.<sup>[7]</sup>

Data perhitungan pada Tabel 1 diperoleh bahwa makin tinggi pemuatan uranium (pada volume sama) jumlah uranium di dalam bahan bakar  $U_3Si_2$  makin banyak, sedang jumlah matriks Al-nya makin sedikit. Dengan peningkatan jumlah uranium dengan bentuk serbuk yang tidak beraturan serta perbedaan berat jenis  $U_3Si_2$  ( $12,20 \text{ g/cm}^3$ ) dan serbuk Al ( $2,70 \text{ g/cm}^3$ ) yang cukup jauh, maka berdasar pengamatan selama pengerjaan proses homogenisasinya menjadi semakin sulit.

Pengaruh gravitasi menyebabkan serbuk  $U_3Si_2$  cenderung mengalir dan berkumpul di bagian bawah, sedang bentuk butiran serbuk  $U_3Si_2$  yang tidak beraturan memiliki mampu alir rendah. Bentuk butiran serbuk sangat berbeda dengan bentuk butiran dalam kondisi ideal (bulat) karena pembuatannya melalui proses penumbukan.

Melalui proses homogenisasi, campuran serbuk  $U_3Si_2$  dan serbuk Al selama 20 menit dengan pemanasan pada suhu  $180^\circ\text{C}$  selama 3,0 jam, kemudian pengepresan menjadi IEB pada tekanan 170 bar, diperoleh data uji radiografi sinar-X terhadap IEB seperti ditampilkan pada Gambar 3. Dari gambar tersebut dapat diidentifikasi, bahwa warna terang adalah citra uranium, sedang warna gelap menunjukkan citra matriks Al. Uranium tersebar merata dan makin tinggi muatannya, menyebabkan distribusi uranium di dalam IEB makin rapat. Pengamatan secara kualitatif terlihat bahwa distribusi uranium cukup homogen dan tidak terdapat adanya aglomerasi uranium yaitu noda putih yang berdiameter  $> 1 \text{ mm}$ , sehingga memberi indikasi bahwa distribusi uranium cukup homogen. Berdasar spesifikasi bahan bakar RSG-GAS dapat dinyatakan bahwa IEB yang dibuat telah memenuhi syarat<sup>[4]</sup>.

#### b. Kondisi operasi:

Sistem kalibrasi pada percobaan ini dimulai dengan mencari daerah intensitas sinar-X spesifik yang diteruskan oleh PEB muatan uranium antara 3,60 s.d.  $5,20 \text{ g/cm}^3$  dengan mengubah parameter diameter celah (*slit*) dan energi sinar-X. Dengan mengubah parameter *slit* dari 10 s.d. 18 mm dan energi sinar-X antara 34 s.d. 45 kV diperoleh kondisi pengukuran homogenitas PEB  $U_3Si_2$ -Al pemuatan uranium antara 3,60 dan  $5,20 \text{ g/cm}^3$  dengan menggunakan *slit* : 18 mm dan energy 43 kV. Pengujian menggunakan *slit*  $< 18 \text{ mm}$  dengan energy antara 34 s.d 45 kV, intensitas sinar-X yang diteruskan sangat kecil, sebaliknya menggunakan *slit*  $> 18 \text{ mm}$  pada daerah energy yang sama intensitas sinar-X yang diteruskan -terlalu besar sehingga akurasi pengukuran kurang baik.

Kondisi operasi tersebut di atas digunakan untuk mengkalibrasi balok AlMgSi dengan variasi tebal untuk mendapatkan daerah serapan yang sama. Data kalibrasi tebal balok AlMgSi1 dan PEB dengan muatan uranium antara 3,60 s.d  $5,20 \text{ g/cm}^3$  dibuat grafik untuk menentukan ketebalan balok standar yang harus dibuat dalam pengukuran PEB  $U_3Si_2$ -Al dengan muatan uranium yang akan diuji. Hubungan intensitas sinar-X yang diteruskan masing-masing PEB atau variasi tebal balok AlMgSi1 ditunjukkan pada Gambar 4. Makin tinggi muatan uranium dalam PEB atau makin tebal balok AlMgSi1, intensitas sinar-X yang diteruskan semakin sedikit. Sebaliknya, makin rendah muatan uranium dalam PEB dan makin tipis balok AlMgSi, intensitas sinar-X yang diteruskan semakin banyak. Data percobaan ini sesuai dengan persamaan 1, bahwa tebal atau koefisien absorpsi material sangat berpengaruh terhadap sinar-X yang diteruskan. Makin tebal material atau makin besar koefisien absorpsi material yang diuji, maka sinar-X yang diteruskan semakin sedikit.

Berdasar data kalibrasi pada Gambar 4, maka tebal balok AlMgSi1 standar untuk setiap muatan uranium di dalam PEB dapat ditentukan. Dengan mengasumsi toleransi pengukuran homogenitas sebesar  $\pm 20 \%$ , maka standar undakan balok AlMgSi1 dapat ditentukan seperti ditunjukkan pada Gambar 5, yang selanjutnya digunakan sebagai standar pengukuran homogenitas PEB dengan pemuatan uranium yang sesuai.

Teknik pengujian homogenitas dilakukan dengan menempatkan PEB dan undakan balok AlMgSi1 standar yang sesuai pada penggerak ke satu arah dalam alat atenuasi sinar-X. Tampilan hasil uji homogenitas PEB sepanjang 60 cm (Gambar 6) menunjukkan bahwa distribusi uranium yang divisualisasikan dalam kertas rekam gambar berbentuk puncak-puncak (*peak*) yang tidak beraturan. Data tersebut menunjukkan bahwa homogenitas uranium di dalam PEB tidak sempurna. Tingkat homogenitas ditentukan dengan menghit-tung penyimpangan puncak tertinggi dari standar nominal, kemudian dibandingkan dengan toleransinya. Dari hasil uji homogenitas uranium di dalam *meat* bahan bakar dengan muatan uranium  $4,80 \text{ g/cm}^3$  yang menggunakan undakan balok AlMgSi1 standar (kode X), diperoleh hasil homogenitas uranium yang cukup baik dengan penyimpangan maksimum 6,30 %, sedang pengujian PEB dengan muatan uranium  $5,20 \text{ g/cm}^3$  menggunakan undakan balok AlMgSi1 standar (kode Y) diperoleh homogenitas dengan penyimpangan maksimum sebesar 6,90 %. Penyimpangan homogenitas ini masih memenuhi syarat batas yang diijinkan yaitu maksimum sebesar 20 %, sehingga metode ini dapat digunakan untuk pengukuran homogenitas uranium di dalam PEB secara tidak merusak.

Ketidaktepatan tingkat homogenitas uranium di dalam *meat* PEB terlihat jelas dari hasil uji metalografi irisan PEB muatan uranium  $4,80$  dan  $5,20 \text{ g/cm}^3$ , seperti ditampilkan pada Gambar 7. Pada gambar tersebut terlihat bahwa distribusi uraniumnya sangat berbeda dengan kondisi ideal seperti yang divisualisasikan Gambar 1. Warna gelap dalam gambar adalah  $\text{U}_3\text{Si}_2$ , sedang warna terang adalah matriks Al. Penyimpangan dari kondisi ideal tersebut disebabkan butiran serbuk  $\text{U}_3\text{Si}_2$  yang digunakan pada percobaan ini tidak beraturan akibat proses penyerbukan ingot hasil peleburan. Selain itu, pengaruh proses pengerolan PEB memberikan kontribusi yang cukup besar terhadap distribusi uranium. Adanya tekanan mengakibatkan butiran  $\text{U}_3\text{Si}_2$  pecah. Dari data hasil percobaan diperoleh bahwa homogenitas uranium di dalam PEB  $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$  dengan muatan uranium  $4,80$  dan  $5,20 \text{ g/cm}^3$  memenuhi persyaratan bahan bakar dispersi. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi proses pembuatan PEB cukup baik dan undakan balok AlMgSi1 yang digunakan

sebagai standar pengujian homogenitas sudah tepat.

## SIMPULAN

1. Dari hasil pengujian homogenitas terhadap 4 PEB muatan uranium  $4,80 \text{ g/cm}^3$  dan 4 PEB muatan uranium  $5,20 \text{ g/cm}^3$  yang diskaning dengan *slit* 18 mm dan daya 43 kV, diperoleh data pengukuran yang cukup baik dengan simpangan pengukuran masing-masing sebesar 6,30 % dan 6,90 %. Penyimpangan tersebut masih di dalam batas yang dipersyaratkan yaitu maksimum sebesar  $\pm 20$  %.
2. Dengan menggunakan standar undakan yang tepat, maka kesalahan pengukuran homogenitas uranium dalam PEB dapat diperkecil.
3. Dari pengujian homogenitas uranium di dalam PEB dengan metode atenuasi sinar-X diperoleh hasil pengukuran yang cukup baik, mudah dan cepat, sehingga cocok digunakan untuk pengujian homogenitas uranium dalam skala industri.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Dengan selesainya penelitian dan penyusunan tulisan ini, diucapkan terimakasih kepada seluruh staf Divisi Produksi Elemen Bakar Nuklir, PT. Batan Teknologi yang telah berkenan memberikan bantuan dan sumbang sarannya.

## PUSTAKA

- [1]. SAMOILV, A.G., et.al., "Dispersion Fuel Nuclear Reactor Elements", Atomizdat, Moskva, 1965.
- [2]. HOFMAN, G.L., and SNELGROVE. J.L., "Dispersion Fuels", ANL, 1994.
- [3]. FOSTER, B.E., et.al., "X-RAY ATTENUATION OF NUCLEAR FUEL PLATES", Metals and Ceramics Division, ORNL, June 1969.
- [4]. NUKEM GmbH, "Discription of the Nukem Quality Control of Fuel Element Fabrication", Part 3, 1982.
- [5]. "Laporan Pekerjaan Dukungan Penelitian dan Pengembangan" Kerjasama PT.BATAN Teknologi (Persero) dengan Kowaba Dagstan, Jakarta 1997.
- [6]. CULITY, B.D., "Elements of X-Ray Diffraction" second edition, Department of

Metallurgical engineering and Materials Science, University of Notre Dame, 1978.

- [7]. SUPARDJO, dkk, " Pengaruh Tingkat Muat Uranium Terhadap Produk Elemen Bakar  $U_3Si_2-Al$ ", Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah PPNY-BATAN Yogyakarta 25-27 April 1995.
- [8]. SAVORNIN, B., and FANJAS, Y.R., "CERCA Contribution The RERTR ", Status of Development, November 9, 1982.
- [9]. FANJAS, Y.R., "CERCA Contribution The RERTR ", Status of Development, November 9, 1982.

#### TANYA JAWAB

##### 1. Endiah Puji Hastuti

- Dalam penelitian sebelumnya dijelaskan bahwa masih terjadi *dog boning* pada U silisida dengan tingkat muat 5,20 grU/cm<sup>3</sup>. Apakah penelitian ini merupakan langkah maju dari apa yang telah dilakukan, sebab perlu adanya jaminan tidak terjadi pelepasan gas hasil fisi/lokal heat apabila disisipkan ke teras RSG-GAS.
- Adanya kesulitan pada daur ulang bahan bakar silisida, kecenderungan penelitian bahan bakar menuju ke uranium molybdenum. Apakah rencana penyisipan elemen bakar silisida dengan tingkat muat tinggi tetap akan diteruskan, mengingat waktu yang dibutuhkan untuk mencapai *burn up* 56% akan memakan waktu yang cukup lama (2½ tahun)?.

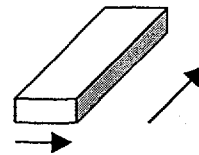
##### Supardjo

- Pada tingkat muat uranium 5,20 gr/cm<sup>3</sup> memang terjadi *dog boning* di ujung *meat* pelat elemen bakar, namun dari hasil uji homogenitas distribusi uranium di dalam *meat* ternyata cukup homogen dengan simpangan maksimum sebesar 6,90%. Hal ini menunjukkan bahwa distribusi uranium di dalam *meat* memenuhi spesifikasi bahan bakar sesuai batas simpangan maksimum  $\pm 20\%$  yang telah ditetapkan. Dengan demikian apabila bahan bakar digunakan di reaktor dan dioperasikan pada kondisi normal, tidak akan terjadi pelepasan gas hasil fisi keluar dari pelat elemen bakar maupun *local heat*.
- Uji iradiasi terhadap bahan bakar  $U_3Si_2-Al$  dengan tingkat muat uranium tinggi

tetap dilanjutkan. Sementara menunggu hasil uji iradiasi dan uji pasca iradiasi terhadap bahan bakar tersebut, kami juga telah dan sedang melakukan penelitian olah ulang gagal proses bahan bakar silisida serta penelitian bahan bakar paduan UMo.

##### 2. Eric Johneri

- Mohon penjelasan cara pengukuran homogenitas dengan atenuasi sinar X terhadap material melalui satu penampang atau dua penampang?
- Terhadap dua penampang kemudian di ambil rata-ratanya karena luas penampang bidang ukur berbeda.



##### Supardjo

- Pengukuran homogenitas uranium di dalam *meat* dengan sinar X melalui satu sisi penampang lebar plat elemen bakar.
- Pengukuran terhadap dua penampang hasilnya dapat diambil reratanya, asal pengukuran dilakukan terhadap ketebalan benda uji yang sama.

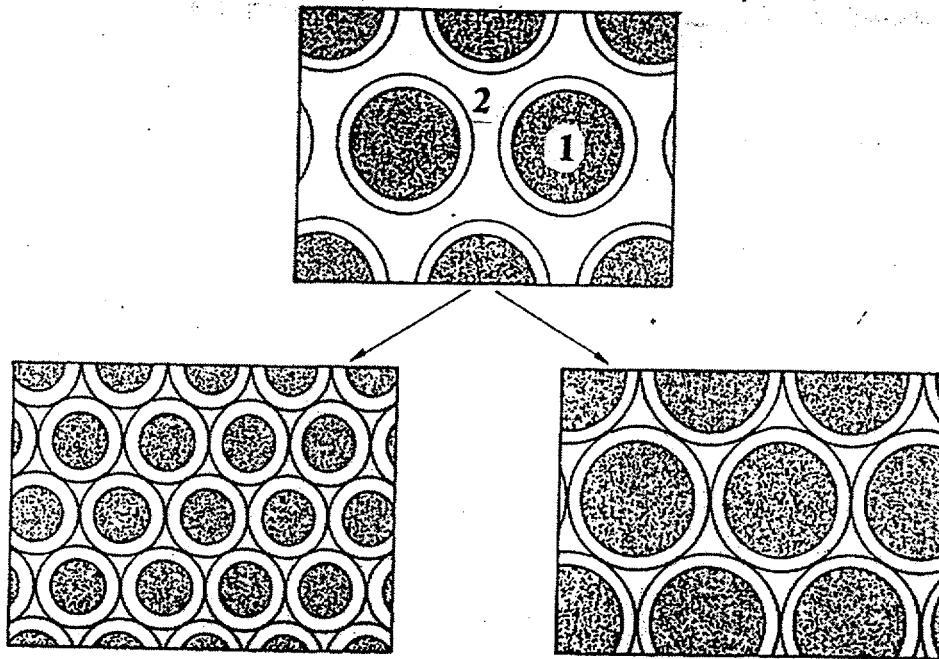
##### 3. Siti Amini

- Absis pada gambar 4.
- Apa yang diharapkan setelah pasca iradiasi dalam kaitannya dengan efek dari homogenitas U tersebut.

##### Supardjo

- Absis pada gambar 4 adalah menunjukkan tebal balok AlMgSi1 (dalam cm) dan tingkat pemuatan uranium (dalam gr/cm<sup>3</sup>).
- Yang diharapkan dari homogenitas distribusi U adalah agar produk fisi tersebar merata diseluruh *meat* bahan bakar sehingga tidak terjadi swelling dan heat spot di daerah tertentu pada pelat elemen bakar. Untuk mengetahui hal ini dapat dilakukan uji metalografi terhadap pelat elemen bakar pasca iradiasi.

LAMPIRAN



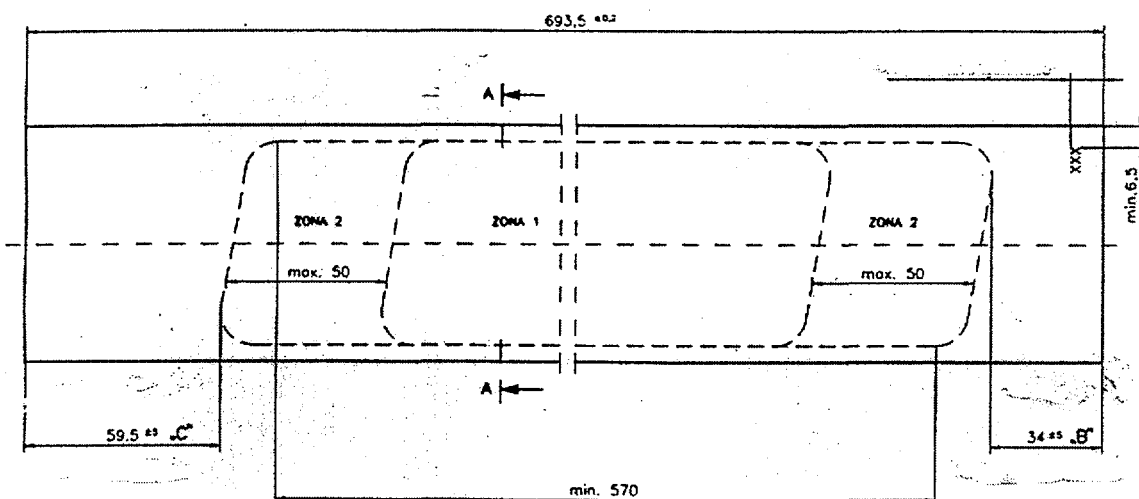
Fraksi volume bahan bakar tetap, ukuran butir lebih kecil

Ukuran butir bahan bakar tetap, fraksi volume lebih besar

Gambar 1. Distribusi bahan bakar di dalam matriks<sup>[1,2]</sup>. Warna gelap menunjukkan bahan bakar  $U_3Si_2$ , dan warna terang menunjukkan serbuk Al.

Tabel 1. Perbandingan berat serbuk  $U_3Si_2$  & Al dalam IEB dengan variasi muatan Uranium

Pemuatan uranium, $g/cm^3$	Berat serbuk $U_3Si_2$ , g	Berat serbuk Al, g	Jumlah IEB
3,60	75,09	32,21	1
4,20	87,61	29,43	1
4,80	100,12	26,78	5
5,20	108,47	24,95	5



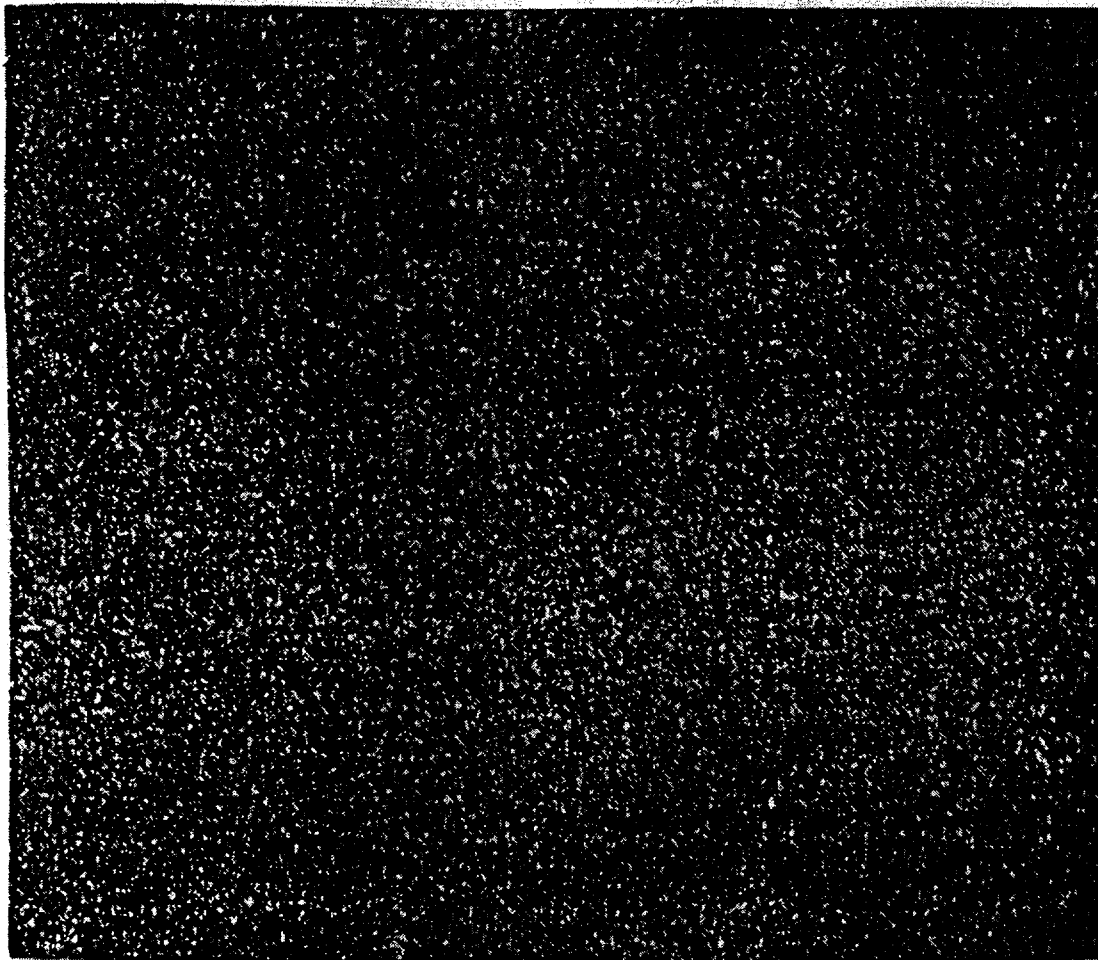
Gambar 2. Dimensi PEB  $U_3Si_2$ -Al (dengan satuan, mm)

Tabel 2. Data analisis unsur logam penyerta di dalam serbuk  $U_3Si_2$

No.	Unsur logam	Konsentrasi dalam ppm
1	Al	896,00
2	B	3,00
3	Ca	16,97
4	Cu	65,80
5	Fe	473,54
6	Ni	214,60
7	Zn	9,95

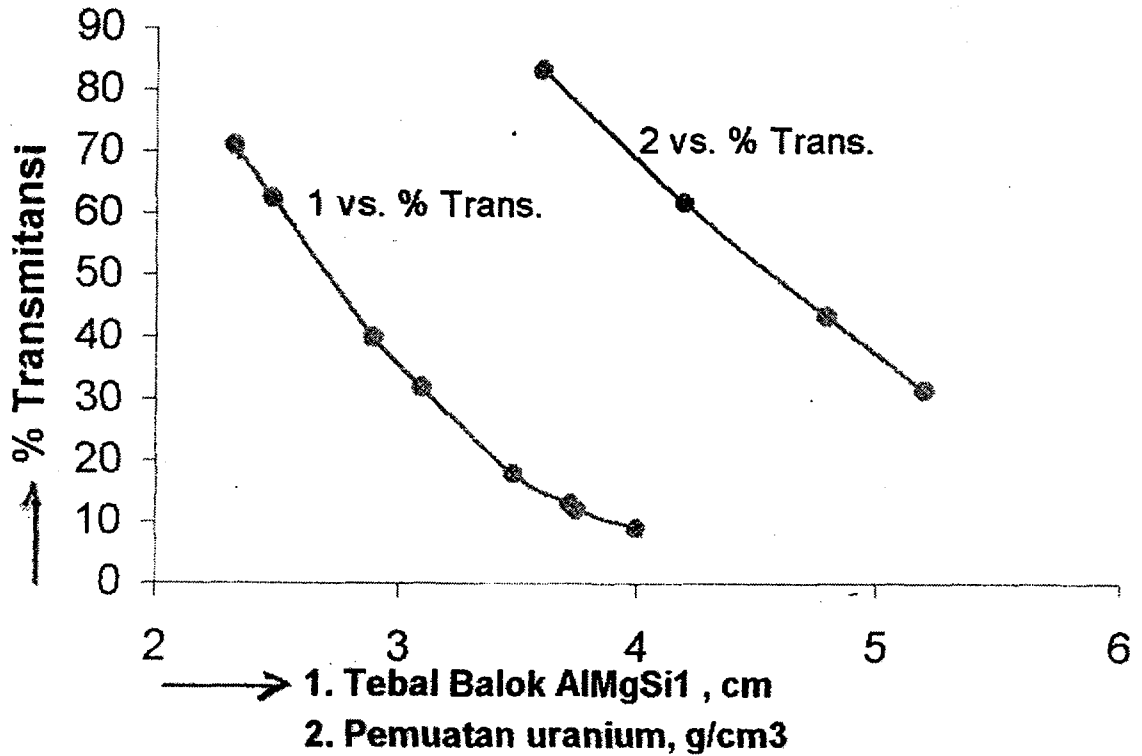
Tabel 3. Data analisis unsur logam penyerta di dalam serbuk Al

No.	Unsur logam	Konsentrasi dalam ppm
1	Li	4,40
2	Mg	30,00
3	Mn	220,00
4	Cu	18,40
5	Fe	288,00
6	Si	1700,00
7	Zn	9,95

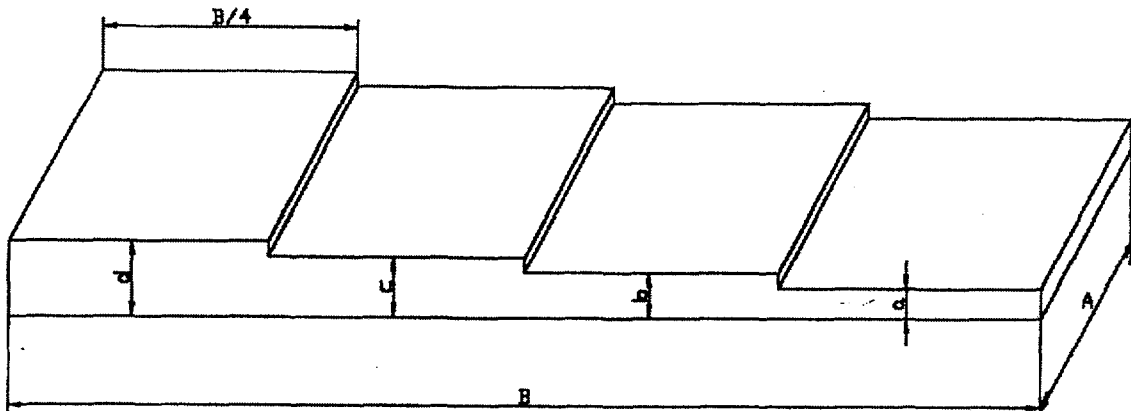


Gambar 3. Foto hasil uji radiografi IEB  $U_3Si_2$ -Al. Warna gelap menunjukkan matriks Al dan warna terang menunjukkan uranium





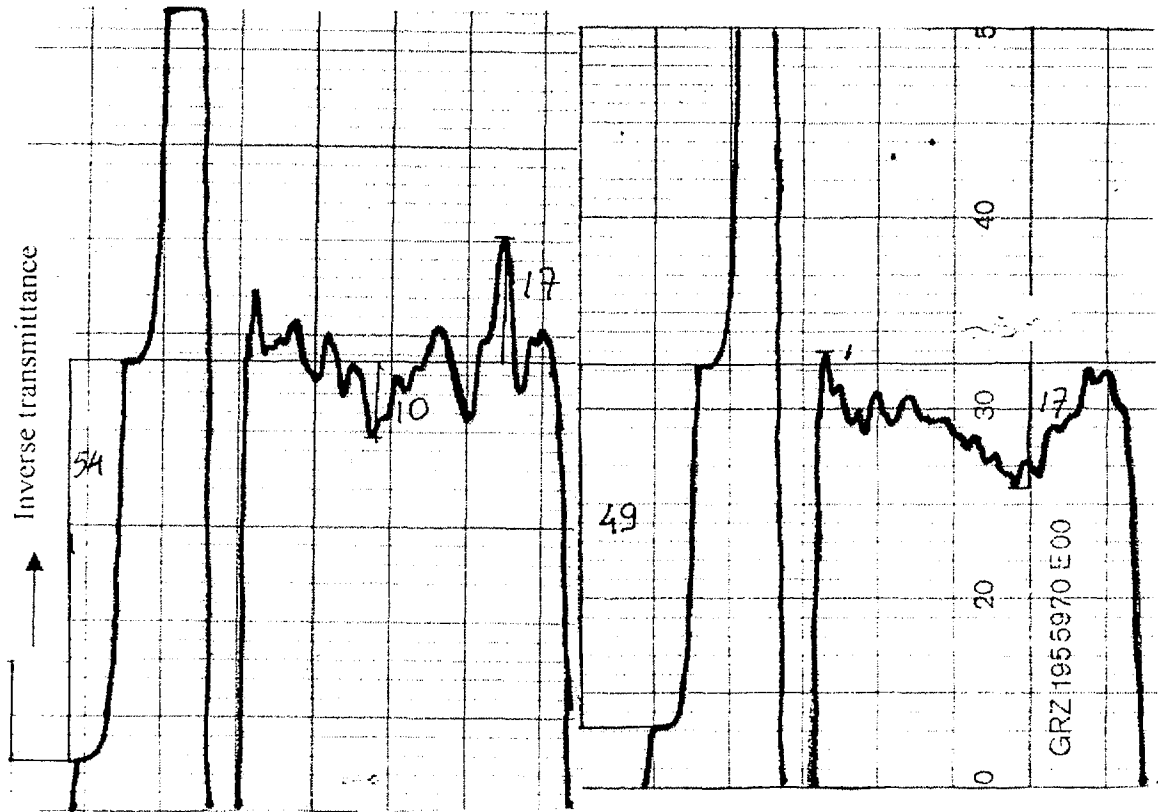
Gambar 4. Hubungan intensitas sinar-X vs variasi tebal balok AlMgSi1 dan muatan uranium di dalam PEB .



Keterangan :

No	Kode	Standar PEB, dengan muatan U, g/cm <sup>3</sup>	Dimensi, cm					
			A	B	a	b	c	d
1	X	4,80	6,0	32,0	2,32	2,90	3,48	3,75
2	Y	5,20	6,0	32,0	2,48	3,10	3,72	4,00

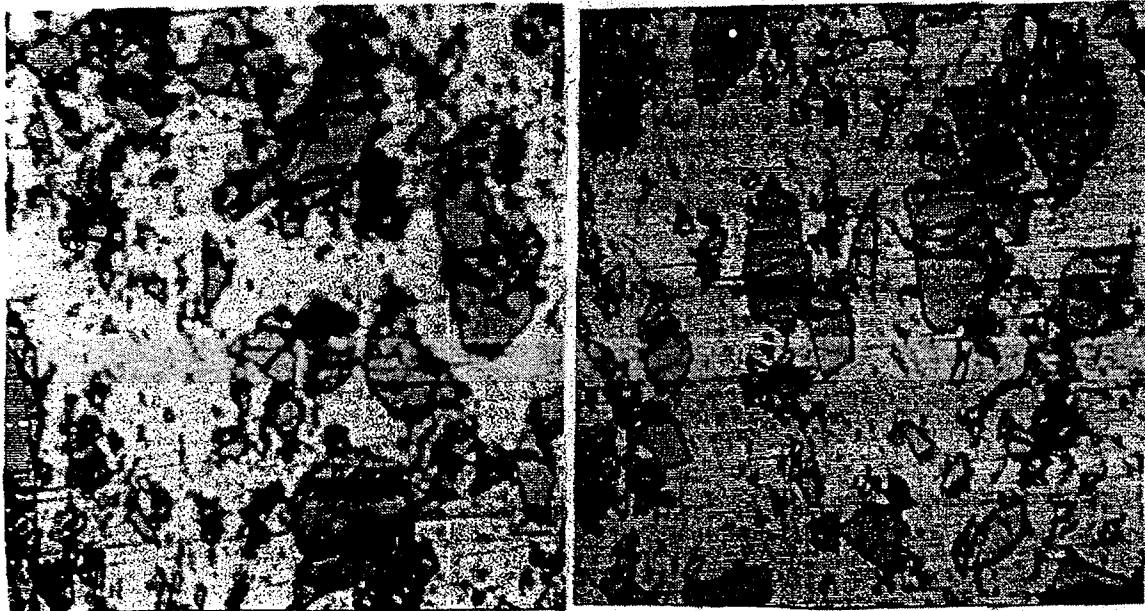
Gambar 5. Standar undakan balok AlMgSi1



muatan uranium 4,80 g/cm<sup>3</sup>

muatan uranium 5,20 g/cm<sup>3</sup>

Gambar 6. Data atenuasi sinar-X PEB U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>-Al dengan muatan uranium 4,80 dan 5,20 g/cm<sup>3</sup>



100 μm

muatan uranium 4,80 g/cm<sup>3</sup>

100 μm

muatan uranium 5,20 g/cm<sup>3</sup>

Gambar 7. Distribusi fasa di dalam meat PEB muatan uranium 4,80 dan 5,20 g/cm<sup>3</sup>. Warna gelap menunjukkan U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> dan warna terang menunjukkan matriks Al.