

PENGARUH PERBEDAAN SERBUK U_3O_8 DAN U_3Si_2 TERHADAP PEMBENTUKAN POROSITAS, HOMOGENITAS URANIUM DAN KETEBALAN KELONGSONG PRODUK PELAT ELEMEN BAKAR U_3O_8 -Al DAN U_3Si_2 -Al.

Supardjo⁽¹⁾ dan Boybul⁽¹⁾

1. Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir - BATAN
Kawasan Puspptek, Serpong, Tangerang

ABSTRAK

PENGARUH PERBEDAAN SERBUK U_3O_8 DAN U_3Si_2 TERHADAP PEMBENTUKAN POROSITAS, HOMOGENITAS URANIUM DAN KETEBALAN KELONGSONG PRODUK PELAT ELEMEN BAKAR U_3O_8 -Al DAN U_3Si_2 -Al. Penelitian pengaruh bahan baku U_3O_8 dan U_3Si_2 dalam proses pembuatan pelat elemen bakar (PEB) U_3O_8 -Al dan U_3Si_2 -Al telah dilakukan. Serbuk U_3O_8 merupakan hasil proses kalsinasi amonium uranil karbonat (AUK), sedangkan serbuk U_3Si_2 hasil giling ingot U_3Si_2 (U-7,5% berat Si). Campuran serbuk U_3O_8/U_3Si_2 dan serbuk Al dengan perbandingan sesuai densitas uranium 2,96g/cm³, dipres pada tekanan 175 bar membentuk inti elemen bakar (IEB). Selanjutnya dibungkus dengan *frame* dan *cover* pelat AlMg2 dan pada sisi sambungannya dilas beberapa titik sehingga membentuk paket rol. Paket rol ditipiskan dengan pengerolan panas pada suhu 425°C (4 tahap), rol dingin (beberapa tahap) dan proses pikling hingga diperoleh PEB dengan ketebalan 1,3 mm. Hasil uji PEB U_3O_8 -Al dan U_3Si_2 -Al (masing-masing jenis terdiri dari 7 buah) menunjukkan bahwa, homogenitas uranium di dalam *meat* PEB U_3O_8 -Al berkisar antara min. -0,7% dan maks. -13,7%. (rentang rerata 7,33%) lebih baik dari pada PEB. U_3Si_2 -Al min. 0% dan maks -16,3% (rentang rerata 12,23%), namun keduanya masih memenuhi persyaratan standar homogenitas sebesar $\pm 20\%$. Ketebalan kelongsong minimum PEB. U_3O_8 -Al = 0,254 mm, sedangkan PEB. U_3Si_2 -Al = 0,310mm, namun keduanya masih memenuhi persyaratan standar minimal 0,25 mm. Prosen porositas naik sesuai dengan kenaikan fraksi volume bahan bakar, dan pada fraksi volume yang sama porositas di dalam PEB. U_3O_8 -Al lebih besar dari pada PEB. U_3Si_2 -Al. Berdasar data hasil pengujian, dapat disimpulkan bahwa semua PEB memenuhi persyaratan bahan bakar reaktor riset tipe pelat.

Kata kunci: bahan bakar dispersi, PEB. U_3O_8 -Al, PEB. U_3Si_2 -Al

ABSTRACT

THE INFLUENCE OF U_3O_8 AND U_3Si_2 POWDER DIFFERENCE TOWARD THE FORMATION OF POROSITY, URANIUM HOMOGENEITY AND CLADDING THICKNESS OF U_3O_8 -Al AND U_3Si_2 -Al FUEL PLATE PRODUCT. Research of raw material influence of U_3O_8 and U_3Si_2 in the making of U_3O_8 -Al and U_3Si_2 -Al fuel plate has been conducted. The U_3O_8 represent result of the amonium uranil carbonate calcination process, while U_3Si_2 powder result by milling ingot U_3Si_2 (U-7,5w%). The mixture of U_3O_8/U_3Si_2 and Al powder with the comparison according of 2.96g/cm³ uranium densities,

are pressed at 175 bar form the fuel core. Hereinafter the mixture has wrapped by frame and cover AlMg2 plate and its extension side welded of some point so that form the roll packet. Hereinafter roll packet thinned down by hot rolling at temperature $425^{\circ}C$ (4 phase), cooled roll (some phase) and the pickling process till obtained fuel plate thickness 1.3 mm. The test result of U_3O_8 -Al fuel plate and U_3Si_2 -Al (each type consisted of 7 fuel plate) indicating that, uranium homogeneity in U_3O_8 -Al fuel meat range from the min. – 0.7 % and max. – 13.7% (spanning average 7.33%) is better than U_3Si_2 -Al fuel meat min. 0% and max. - 16,3% (spanning average 12.23%), but both still fulfill the conditions of homogeneity standar equal to $\pm 20\%$. The minimum of cladding thickness of U_3O_8 -Al fuel plate 0.254 mm, while U_3Si_2 -Al fuel plate = 0.310mm, but both still fulfill the minimum conditions standard 0.25 mm. The porosity go up as according to the fuel volume fraction increase, and same volume fraction of porosity in U_3O_8 -Al fuel plate is bigger than U_3Si_2 -Al fuel plates. Based on the data result of examination, can conclude that any fuel plates fulfill the conditions of the research reactor fuel plate.

Key Words : Dispersion fuel, U_3O_8 -Al fuel plate, U_3Si_2 -Al fuel plate

PENDAHULUAN

• Bahan Bakar Dispersi

Bahan bakar dispersi tipe pelat telah digunakan sebagai bahan bakar reaktor riset tipe Materials Testing Reactor (MTR) sejak awal tahun 1950 an. Pada awalnya, bahan bakar dispersi dalam bentuk UAl_x -Al dan pada era tahun 1960 dikembangkan bahan bakar U_3O_8 -Al yang keduanya menggunakan uranium pengayaan tinggi ($>90\%U^{235}$). Uranium pengayaan tinggi mudah digunakan untuk senjata nuklir, maka untuk menghindari penyalahgunaan oleh orang yang tidak bertanggung jawab, sejak tahun 1978 semua reaktor riset di dunia dihimbau untuk mengubah penggunaan uranium dari pengayaan tinggi ke pengayaan rendah ($<20\%U^{235}$)^[1]. Sebagai konsekuensi perubahan pengayaan uranium tersebut (dengan tidak mengubah dimensi bahan bakarnya), maka akan terjadi penurunan jumlah uranium hampir 5 kalinya. Untuk kompensasi penggunaan uranium pengayaan rendah, maka diperlukan bahan bakar baru yang memiliki berat jenis tinggi. Bahan bakar UAl_x -Al, U_3O_8 -Al dan U_3Si_2 -Al memiliki densitas uranium masing-masing 2,2, 3,2 dan $4,75\text{ g/cm}^3$ telah banyak digunakan sebagai bahan bakar pada beberapa reaktor riset di dunia dengan unjuk kerja yang cukup baik^[2].

• Fabrikasi

Fabrikasi bahan bakar dispersi tipe pelat dilakukan melalui proses metalurgi serbuk pada pembuatan *fuel core* (inti elemen bakar, IEB) dan pembentukan *fuel plate* (pelat elemen bakar, PEB) dengan teknik pengerolan. Campuran serbuk bahan bakar dan matriks dengan perbandingan tertentu sesuai densitas uraniumnya (fraksi volume bahan bakar), dipres pada tekanan tinggi membentuk IEB. Inti elemen bakar dimasukkan kedalam *frame* (pelat pigura) dan kedua sisinya dibungkus dengan dua *cover* (pelat tutup) serta dilas beberapa titik pada keempat sisi sambungannya menjadi paket rol. Selanjutnya dirol panas dan dingin hingga ketebalanan 1,3 mm dan dipotong pada keempat sisinya sehingga membentuk PEB^[3].

Secara ideal, bahan bakar dispersi adalah partikel bahan bakar yang terdistribusi merata di dalam serbuk matriks. Kondisi ideal tersebut sulit dipenuhi karena banyak parameter yang sangat berpengaruh diantaranya: perbedaan berat jenis antara bahan bakar dan serbuk matriks, bentuk partikel serbuk dll. Apabila perbedaan berat jenisnya cukup jauh maka pada proses homogenisasi akan terjadi aglomerasi karena gaya gravitasi, sedangkan bentuk partikel

serbuk bahan bakar yang tidak beraturan menyebabkan mampu alir serbuk menurun akibat friksi. Faktor-faktor itulah yang memberi kontribusi penyebab ketidak sempurnaan homogenitas, selain proses pengepresan dan pengerolan.

Selama proses pengepresan campuran serbuk bahan bakar U_3O_8/U_3Si_2 dan matriks Al (membentuk IEB) serta pengerolan PEB, terjadi deformasi. Deformasi menyebabkan pergerakan partikel yang mengakibatkan partikel-partikel retak/pecah di dalam zona bahan bakar dan cenderung memberi kontribusi pembentukan porositas. Kecenderungan partikel terdeformasi tergantung pada tekanan aliran material. Pemindahan tekanan antar partikel yang berdekatan tergantung topography, ukuran dan bentuknya. Permukaan partikel yang tidak teratur menyebabkan peningkatan friksi antar partikel, yang mengakibatkan tekanan aliran lebih tinggi yang pada akhirnya porositas produk PEB lebih tinggi pula^[4]. Terbentuknya porositas dapat disebabkan oleh beberapa faktor diantaranya: bentuk partikel serbuk, diameter partikel serbuk, tekanan pengepresan IEB, pengerolan PEB dan fraksi volume bahan bakar.

Proses pengerolan juga menyebabkan terjadinya deformasi dan pergerakan partikel serbuk bahan bakar serta matriks sesuai arah rol. Deformasi dan pergerakan partikel paling besar terjadi pada pengerolan panas tahap awal. Pengerolan panas tahap pertama harus dilakukan dengan reduksi ketebalan cukup besar. Hal ini dimaksudkan agar terbentuk ikatan yang baik antara kelongsong dan IEB, tidak bergeser dan tidak ada udara yang terperangkap di dalam zona bahan bakar. Keberadaan udara di dalam zona bahan bakar harus dihindari karena dapat membentuk blister/lepuhan. Apabila terbentuk blister, maka mengindikasikan bahwa ikatan antar material dalam PEB kurang kuat sehingga pada proses iradiasi dikawatirkan gas produk fisi mengumpul pada lepuhan tersebut dan

mengakibatkan *swelling*. Makin tinggi densitas uranium, jumlah serbuk bahan bakar bertambah dan matriks menurun, dan pada proses pengerolan ada kecenderungan terjadi aglomerasi di ujung PEB membentuk *dog bone* sehingga kelongsong menjadi tipis.

Kelongsong bahan bakar berfungsi untuk mengungkung produk fisi agar tidak lepas dari zona bahan bakar ke air pendingin reaktor maupun lingkungan. Bahan baku kelongsong bahan bakar dispersi tipe pelat banyak digunakan jenis paduan aluminium. Pemilihan paduan aluminium didasari antara lain: kemudahan proses pengerolan /pemesinan, konduktivitas panas baik dan tahan terhadap korosi. Selain persyaratan kualitas bahan baku kelongsong yang harus dipenuhi, ketebalan kelongsong merupakan suatu hal penting yang perlu diperhatikan. Persyaratan umum ketebalan kelongsong bahan bakar dispersi tipe pelat adalah $0,38^{+0,05}_{-0,08}$ mm dengan ketebalan kelongsong minimum 0,25 mm^[3,5,6].

Kualitas produk PEB dipengaruhi oleh beberapa parameter antara lain : proses yang digunakan, jenis material (bahan bakar, kelongsong dan serbuk matriks), bentuk dan fraksi partikel serbuk bahan bakar dan densitas uraniumnya. Dari parameter-parameter tersebut, pada penelitian ini difokuskan pembuatan PEB dengan perbedaan jenis bahan bakar yaitu U_3O_8 -Al dan U_3Si_2 -Al, serta pengujian ketebalan kelongsong/*meat*, porositas dan homogenitas uranium di dalam *meat*.

• Pengujian

Kualitas bahan bakar nuklir merupakan persyaratan utama yang harus dipenuhi, dan pada akhirnya mengarah pada keselamatan dan ekonomi. Untuk memenuhi hal tersebut, maka selama proses fabrikasi harus dilakukan pengujian secara teliti terhadap bahan baku, produk tengah dan produk akhir.

Kualitas serbuk bahan bakar, matriks dan kelongsong perlu diketahui sebelum digunakan sebagai bahan baku proses produksi. Kadar isotop U²³⁵, kadar U dan unsur logam pengotor, berat jenis, fraksi partikel butir merupakan data yang sangat diperlukan untuk menentukan komposisi IEB sesuai densitas uraniumnya. Menggunakan data-data tersebut, densitas uranium dapat dihitung⁽³⁾. Makin tinggi densitas uranium, maka fraksi volume bahan bakar naik sedangkan fraksi volume serbuk matriks menurun. Perbedaan fraksi volume bahan bakar berpengaruh terhadap tingkat homogenitas uranium di dalam matriks Al dan akan berdampak terhadap kualitas produk PEB.

Homogenitas uranium di dalam meat bahan bakar dispersi sangat ditentukan oleh jenis dan bentuk partikel serbuk bahan bakar, proses homogenisasi, pengepresan pembentukan IEB dan pengerolan menjadi PEB. Pada proses homogenisasi antara serbuk U₃O₈/U₃Si₂ dan Al ada kecenderungan pemisahan karena perbedaan berat jenis yang cukup tinggi (8,4 g/cm³ untuk U₃O₈, 12,2g/cm³ untuk U₃Si₂ dan 2,7g/cm³ untuk Al) serta ukuran partikel konstituen tersebut. Beberapa metode pengujian homogenitas uranium di dalam *meat* secara tidak merusak (*Non Destructive Test, NDT*) dapat dilakukan antara lain dengan Radiography, Autoradiography, Gamma counting dan radiografi sinar-X^[7].

Metode pengujian dengan radiografi sinar-X, homogenitas uranium di dalam *meat* PEB dapat diketahui dengan mencatat attenuasi sinar-X yang dilewatkan di atas permukaan PEB yang diuji. Secara kuantitatif hubungan perubahan konsentrasi uranium dengan attenuasi sinar-X yang ditransmisikan melalui sampel uji dapat dilukiskan dengan persamaan 1^[8].

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

Keterangan :

- I = intensitas yang ditransmisikan
- I₀ = intensitas awal

- μ = koefisien absorpsi, cm⁻¹
- ρ = berat jenis bahan, g/cm³
- μ/ρ = konstanta material
- x = ketebalan absorber, cm

Koefisien absorpsi naik sesuai kenaikan nomor atom absorber/sampel dan menurun dengan kenaikan energi sinar-X. Pengaruh attenuasi matriks Al dan kelongsong paduan Al dapat diabaikan terhadap atenuasi efektif uraniumnya karena bilangan μ logam Al sangat kecil dibanding μ uranium.

Hasil penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat dalam penelitian dan pengembangan bahan bakar dispersi tipe pelat, terutama pada unit fabrikasi dan sekaligus merupakan pengalaman yang dapat digunakan sebagai dasar pengembangan lebih lanjut.

TATA KERJA

- Bahan : Serbuk bahan bakar U₃Si₂ dan U₃O₈, serbuk matriks Al dan pelat AlMg2 sebagai kelongsong
- Peralatan : Instalasi fabrikasi elemen bakar reaktor riset tipe pelat dan peralatan uji merusak dan tidak merusak
- Alur penelitian :

Pada penelitian ini digunakan bahan baku U₃O₈ hasil proses kalsinasi amonium uranil karbonat dan U₃Si₂ yang dibuat melalui proses peleburan (U-7,5% berat Si) di dalam tungku busur listrik bermedia gas argon (Ar). Ingot U₃Si₂ hasil peleburan dan U₃O₈ diubah menjadi serbuk dengan cara penggilingan/penggerusan. Serbuk U₃Si₂/U₃O₈ (diameter partikel -90 + 40 μm = 75 - 85% dan -40μm= 15-25%) ditambah sejumlah serbuk matriks Al sesuai densitas uranium 2,96g/cm³, kemudian dihomogenisasi dan dipres pada tekanan 175 bar sehingga membentuk IEB berukuran 100 x 60 x ±3,15 mm. Inti elemen

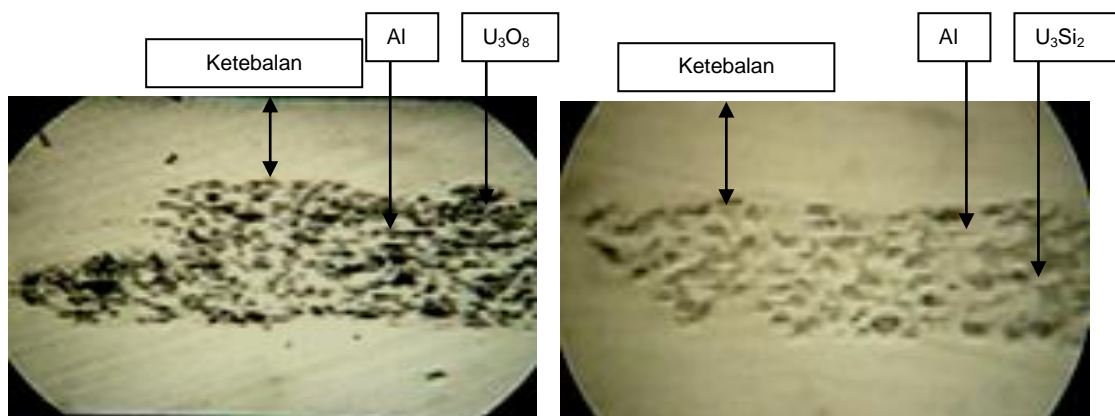
bakar dibungkus menggunakan *frame* dan *cover* dari AlMg2 berukuran masing-masing 180 x 145 x ±3,15 mm dan 180 x 145 x ±2,70 mm serta dilas beberapa titik pada keempat sisi sambungannya membentuk paket rol. Selanjutnya dirol panas pada suhu 425°C (4 tahap), rol dingin (beberapa tahap) dan proses pikling sehingga diperoleh PEB dengan ketebalan ± 1,3 mm.

Selama proses pembuatan PEB dilakukan pengujian secara merusak dan tidak merusak dengan tahapan proses seperti ditunjukkan Gambar 1 (lampiran)⁽³⁾. Pengujian/analisa pada penelitian ini meliputi: pengukuran ketebalan kelongsong dan *meat* bahan bakar, homogenitas uranium di dalam *meat*, serta porositas di dalam PEB. Sampel uji ketebalan kelongsong dan *meat* bahan bakar diambil dengan memotong PEB pada sisi dekat (SD), tengah (TG) dan sisi jauh (SJ).

Masing-masing potongan sampel uji dimounting dan diampelas sampai halus, dan dilakukan pengukuran ketebalan kelongsong/*meat* menggunakan mikroskop optik yang dilengkapi fasilitas ukur, sedangkan ketebalan *meat* dihitung dengan cara: tebal PEB dikurangi 2 kali ketebalan kelongsong pada setiap PEB yang diuji. Homogenitas U di dalam *meat* PEB diuji dengan radiografi sinar-X, sedangkan porositas PEB diukur dengan metode *Immerse*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pelat elemen bakar hasil pengerolan berbentuk empat persegi panjang dengan ukuran (±600x70x1,360) mm. Irisan PEB U₃O₈-Al dan PEB U₃Si₂-Al ditunjukkan pada Gambar.2.a.b. terlihat bahwa partikel serbuk bahan bakar tidak terdistribusi sempurna seperti kondisi ideal. Warna hitam adalah bahan bakar U₃O₈/U₃Si₂ yang terdistribusi di dalam matriks Al berwarna putih. Hal ini disebabkan, pada proses pengerolan terjadi deformasi dan terbentuk ikatan metalurgi antara pelat tutup dengan pelat pigura dan pelat tutup dengan *meat* bahan bakar. Batas antara kelongsong dengan *meat* tidak merata.



a. Sisi Dekat. PEB.U₃O₈-Al

b. Sisi Dekat. PEB.U₃Si₂-Al

Gambar 2.a.b. Irisan PEB.U₃O₈-Al dan PEB.U₃Si₂-Al densitas uranium 2,96g/cm³

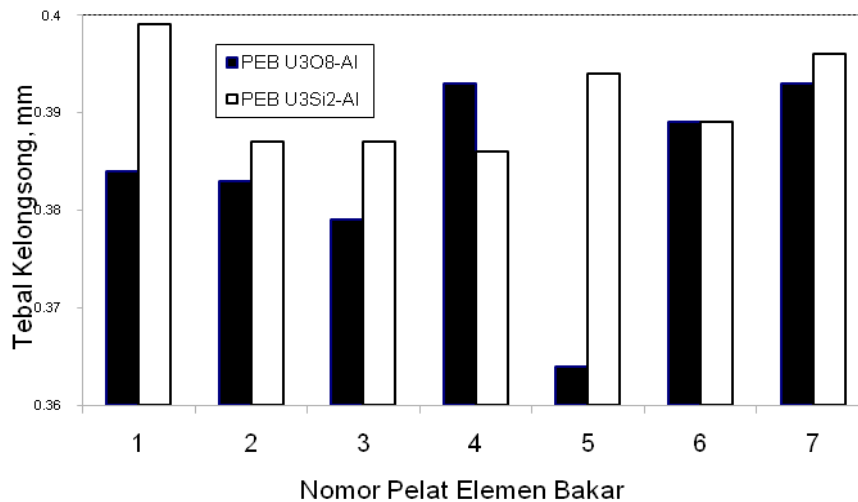
Data uji/pengukuran ketebalan kelongsong dan *meat* PEB U₃O₈-Al/U₃Si₂-Al

densitas uranium 2,96g/cm³ (masing-masing 7 buah), disajikan pada Tabel 1.dan 2.

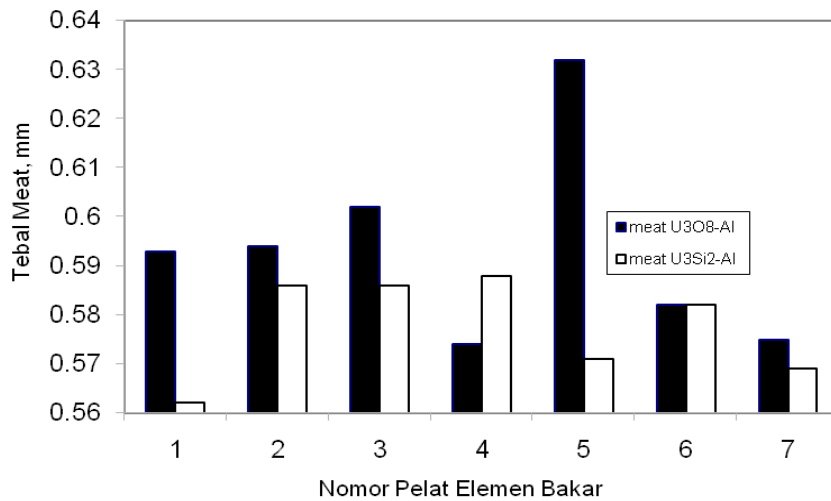
Ketebalan kelongsong terlihat fluktuatif dengan ketebalan minimum untuk PEB. U_3O_8 -Al sebesar 0,254mm terdapat di daerah SJ. PEB. no. 7, sedangkan untuk PEB. U_3Si_2 -Al sebesar 0,310mm di daerah SJ. PEB no.1. Mengamati Gambar 2.a.b. terlihat bahwa *meat* pada ujung PEB. U_3O_8 -Al terlihat mulai terbentuk *dog bone* sehingga kelongsong menjadi tipis, sedangkan ketebalan kelongsong di bagian ujung PEB. U_3Si_2 -Al masih relatif sama dengan bagian tengah. Namun demikian ketebalan kelongsong minimum kedua jenis PEB tersebut masih di atas persyaratan ketebalan kelongsong minimum bahan bakar tipe pelat sebesar 0,25mm.

Hasil rerata ketebalan kelongsong (SJ, TG dan TG) masing-masing PEB dituangkan dalam bentuk grafik (Gambar 3) terlihat bahwa ketebalan kelongsong rerata PEB U_3Si_2 -Al sebesar 0,391mm lebih ketebalan dari

pada PEB. U_3O_8 -Al dengan ketebalan rerata 0,384 mm. Kelongsong PEB. U_3Si_2 -Al lebih ketebalan, kemungkinan disebabkan U_3Si_2 adalah paduan logam dan berat jenis lebih besar dibandingkan dengan U_3O_8 sehingga pada proses pengerolan *meat* U_3Si_2 -Al lebih mampat dibandingkan dengan U_3O_8 -Al. Selain itu makin tinggi fraksi volume bahan bakar, jumlah matrik menurun sehingga pada proses pengerolan ada kecenderungan pengelompokan bahan bakar membentuk *dog bone* sehingga kelongsong pada daerah tersebut menjadi tipis. Hal ini menunjukkan bahwa fraksi volume bahan bakar U_3O_8 -Al sudah mendekati titik maksimum, sedangkan U_3Si_2 -Al masih memungkinkan untuk ditingkatkan. Hasil perhitungan ketebalan *meat* ditunjukkan pada Gambar 4. Ketebalan *meat* PEB. U_3Si_2 -Al rerata 0,578 mm, lebih ketebalan dari pada *meat* PEB. U_3O_8 -Al rerata 0,593mm.



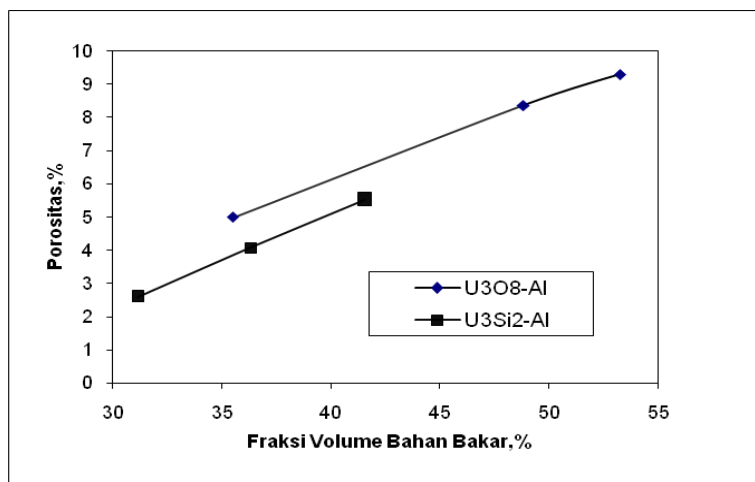
Gambar 3. Ketebalan kelongsong PEB. U_3O_8 -Al dan PEB. U_3Si_2 -Al



Gambar 4. Ketebalan *meat* PEB.U₃O₈-Al dan PEB.U₃Si₂-Al

Hasil uji porositas PEB U₃O₈-Al dan PEB U₃Si₂-Al dengan variasi fraksi volume bahan bakar ditunjukkan pada Gambar 5^[9]. Makin tinggi fraksi volume kedua jenis bahan bakar, prosentase porositas di dalam PEB bertambah, namun pada fraksi volume yang sama porositas PEB.U₃O₈-Al lebih besar. Bahan bakar U₃O₈ adalah keramik dan keras, sedangkan U₃Si₂ bersifat rapuh. Berdasar sifat-sifat tersebut, memungkinkan pada proses

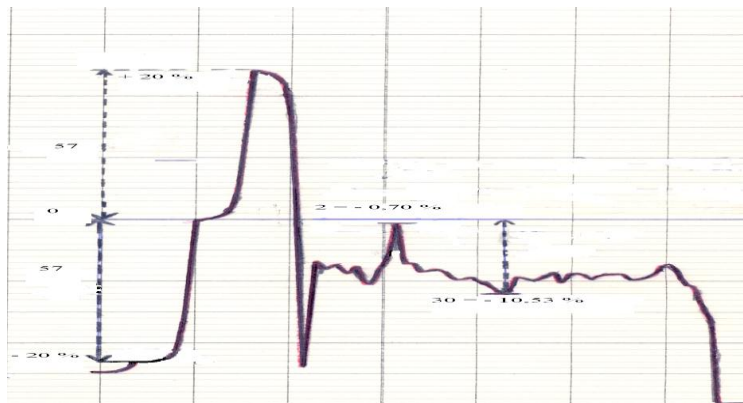
pengerolan bahan bakar U₃O₈ relatif utuh, sedangkan partikel serbuk U₃Si₂ pecah membentuk partikel halus dan mengisi ruangan antar partikel serbuk. Hal ini yang memungkinkan prosentase porositas U₃Si₂ lebih rendah. Keberadaan porositas di dalam *meat* bahan bakar dispersi diperlukan untuk menampung gas produk fisi saat iradiasi di dalam reaktor tahap awal sehingga mengurangi *swelling*.



Gambar 5. Hubungan antara fraksi volume bahan bakar dengan porositas

Hasil uji homogenitas U di dalam *meat* PEB U_3O_8 -Al dan U_3Si_2 -Al menggunakan radiografi sinar-X ditunjukkan pada Gambar 6. Pengujian dilakukan sepanjang PEB, dan distribusi uranium divisualisasikan pada kertas rekam berbentuk *peak-peak* (puncak-puncak) yang menunjukkan distribusi uranium di dalam *meat* PEB. Tingkat homogenitas ditentukan dengan menghitung simpangan dari tinggi puncak-puncak (diukur dari titik 0) dibagi dengan tinggi puncak standar ($\pm 20\%$) dan hasil perhitungan 7 PEB U_3O_8 -Al dan 7 PEB U_3Si_2 -Al ditunjukkan pada Tabel 3. Dari Tabel 3 terlihat bahwa simpangan distribusi

uranium di dalam PEB U_3O_8 -Al minimum -0,7 % dan maksimum -13,7 dengan rentang simpangan rerata 7,33%, sedangkan di dalam PEB U_3Si_2 -Al simpangan minimum 0% dan maksimum -16,3 % dengan simpangan rerata 12,23%. Dengan mengamati data uji kedua jenis PEB tersebut terlihat distribusi uranium di dalam PEB U_3O_8 -Al lebih homogen dibandingkan dengan PEB U_3Si_2 -Al, namun keduanya masih memenuhi persyaratan homogenitas bahan bakar dispersi yaitu sebesar ($\pm 20\%$). Hal ini kemungkinan disebabkan oleh sifat rapuh serbuk U_3Si_2 dan pecah pada saat proses pengerolan menjadi butiran yang lebih kecil dan menyebar di dalam *meat* bahan bakar



Gambar 6. Hasil Uji Homogenitas PEB. U_3O_8 -Al dengan Radiografi Sinar-X

Tabel 3. Homogenitas U di dalam *meat* PEB. U_3O_8 -Al dan U_3Si_2 -Al

| No | Homogenitas U di dalam <i>meat</i> PEB. U_3O_8 -Al, % | | | Homogenitas U di dalam <i>meat</i> PEB. U_3Si_2 -Al, % | | |
|----|---|--------------|-------------------------|--|--------------|-------------------------|
| | Puncak min. | Puncak maks. | Rentang puncak maks-min | Puncak min. | Puncak maks. | Rentang puncak maks-min |
| 1 | - 3,9 | - 9,1 | 5,2 | - 2,8 | + 11,8 | 14,6 |
| 2 | - 6,9 | - 12,0 | 5,1 | - 1,0 | - 16,3 | 15,3 |
| 3 | - 0,6 | - 13,7 | 13,1 | - 1,1 | - 13,3 | 14,4 |
| 4 | - 0,7 | - 10,5 | 9,6 | - 1,1 | - 9,6 | 10,7 |
| 5 | - 0,7 | - 11,0 | 10,3 | 0 | - 10,4 | 10,4 |
| 6 | - 6,3 | - 10,0 | 3,7 | 0 | - 10,4 | 10,4 |
| 7 | - 7,7 | - 13,2 | 5,5 | 0 | - 14,2 | 14,2 |
| | | rerata | 7,33 | | rerata | 12,23 |

Hasil penelitian kedua jenis PEB dengan fokus pengujian ketebalan kelongsong, porositas dan homogenitas distribusi uranium di dalam PEB diperoleh data uji yang semuanya memenuhi kriteria bahan bakar dispersi tipe pelat.

SIMPULAN

Hasil uji terhadap 7 PEB U_3Si_2 -Al dan 7 PEB U_3O_8 -Al dengan densitas uranium $2,96g/cm^3$ dapat disimpulkan sebagai berikut :

Homogenitas uranium di dalam *meat* PEB U_3Si_2 -Al dan PEB U_3O_8 -Al dengan simpangan masing-masing minimum/maksimum 0,0% / -16% dan -0,7% / -13,7%. Data ini menunjukkan bahwa homogenitas uranium cukup baik dan memenuhi rentang batas simpangan maksimum yang dipersyaratkan bahan bakar reaktor riset tipe pelat sebesar $\pm 20\%$.

Ketebalan kelongsong minimum PEB U_3Si_2 -Al dan PEB U_3O_8 -Al masing-masing sebesar 0,310mm dan 0,254mm dengan ketebalanan rerata 0,391mm dan 0,384mm. Ketebalan rerata kelongsong kedua jenis PEB tersebut masih dalam rentang persyaratan sebesar $0,38_{-0,08}^{+0,05}$ mm, namun ketebalan minimum PEB U_3O_8 -Al sudah mendekati batas minimum ketebalan kelongsong yang diijinkan yaitu sebesar 0,25mm. Ini mengindikasikan bahwa apabila densitas uranium PEB U_3O_8 -Al dinaikkan kemungkinan kelongsong menjadi tipis (<0,25mm) sehingga tidak memenuhi persyaratan.

Porositas pada densitas uranium sama di dalam PEB. U_3O_8 -Al lebih besar dibanding PEB. U_3Si_2 -Al dan makin tinggi densitas uranium porositas keduanya makin besar.

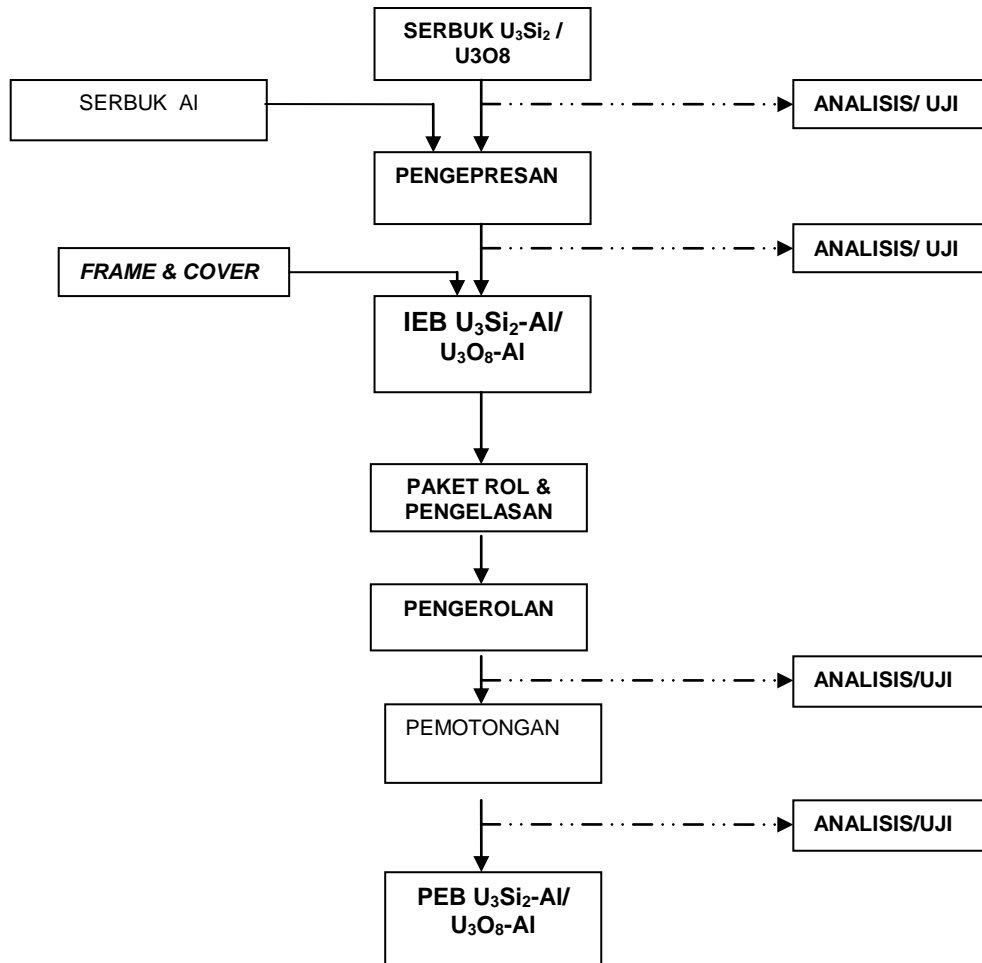
PUSTAKA

1. DOMAGALA,,R.F,et.al," *The Status of Uranium-Silicon Alloy Fuel Development for the RERTR Program*", Proceeding of the International Meeting on Development, Fabrication and Application of RERTR, Argonne, Illinois, November 12-14, 1980.
2. HROVAT, M.F. and HASSEL, H.W," *Recent Status and Future Aspect of Plate Type Fuel Element Technology with High Uranium Density at Nukem*", RERTR, November, 1982.
3. PT. BATAN TEKNOLOGI (Persero)," *Proses produksi elemen bakar dispersi tipe pelat dan pengujian*.
4. WIENCEK, T.C," *A. Study of the Effect of Fabrication Variables on the Quality of Fuel Plates*, RERTR, ANL ", November 3-6, 1986
5. ENDIAH, P.H., dkk., " *Analisis Termohidrolika Disain Kelongsong Elemen Bakar RSG-GAS*", Prosiding Presentasi Ilmiah Daur *Bahan Bakar Nuklir II, PEBN-BATAN, Jakarta 19-20, November, 1996*,
6. DECKERS, J," *Minimum Cladding Thickness of Material Test Reactor Fuel Plate*, RERTR, Petten, The Netherlands, October 14-16,1985
7. FOSTER,B.E.et.al," *Xray Attenuation of Nuclear Fuel Plates*", Metal and Ceramics Division, ORNL, June 1969.
8. CULITY, BD," *Elements of X-Ray Diffraction*", second edition, Department of Metallurgical engineering and Materials Science, University of Notre Dame, 1978
9. SUPARDJO, dkk," *Metode Penentuan Porositas Meat Pelat Elemen Bakar*, Hasil Penelitian EBN ", ISSN 0854-5561, Serpong, 1990-1991.
10. PEACOCK, H.B," *Coextrusion of 60 to 80wt% U_3O_8 Nuclear Fuel Element* ", RERTR, Argonne, Illinois, November, 12-14, 1980.

11. IAEA-TEC DOC," *Standardization of Specifications and Inspection Procedures*

for LEU Plate-Type Research Reactor Fuels ", IAEA, 16-18 April, 1998.

LAMPIRAN



Gambar 1. Diagram alir proses pembuatan PEB U_3O_8 -Al dan U_3Si_2 -Al

Tabel 1. Data Uji PEB U₃O₈-AI

| No | Ketebalan, mm | | | Ketebalan kelongsong sebelum piking, mm | | | | | | | | | | | | Ketebalan stl piking, mm | | | Panjang PEB, mm |
|----|---------------|-------|---------|---|-------|-------|-------------|-------|-------|-----------------|-------|-------|--------|-------|-------|--------------------------|------|-----|-----------------|
| | Frame | Cover | IEB PEB | Sisi jauh (SJ) | | | Tengah (TG) | | | Sisi dekat (SD) | | | rerata | Kel | Meat | PEB | | | |
| | | | | Min | Xrt | Xrt | Min | Xrt | Xrt | Min | Xrt | Xrt | Min | Xrt | Xrt | | | | |
| 1 | 3,186 | 2,721 | 3,18 | 1,42 | 0,350 | 0,413 | 0,416 | 0,379 | 0,415 | 0,414 | 0,286 | 0,410 | 0,411 | 0,414 | 0,384 | 0,593 | 1,36 | 598 | |
| | | | | | 0,310 | 0,419 | | 0,371 | 0,412 | | 0,332 | 0,412 | | | | | | | |
| 2 | 3,188 | 2,716 | 3,16 | 1,42 | 0,339 | 0,406 | 0,405 | 0,352 | 0,420 | 0,418 | 0,333 | 0,435 | 0,417 | 0,413 | 0,383 | 0,594 | 1,36 | 601 | |
| | | | | | 0,320 | 0,403 | | 0,366 | 0,416 | | 0,317 | 0,398 | | | | | | | |
| 3 | 3,183 | 2,716 | 3,17 | 1,42 | 0,341 | 0,400 | 0,401 | 0,374 | 0,404 | 0,414 | 0,305 | 0,418 | 0,413 | 0,409 | 0,379 | 0,602 | 1,36 | 600 | |
| | | | | | 0,356 | 0,402 | | 0,378 | 0,424 | | 0,308 | 0,407 | | | | | | | |
| 4 | 3,185 | 2,712 | 3,17 | 1,41 | 0,353 | 0,415 | 0,416 | 0,398 | 0,431 | 0,422 | 0,331 | 0,421 | 0,416 | 0,418 | 0,393 | 0,574 | 1,36 | 604 | |
| | | | | | 0,365 | 0,417 | | 0,379 | 0,413 | | 0,304 | 0,411 | | | | | | | |
| 5 | 3,179 | 2,711 | 3,16 | 1,41 | 0,324 | 0,388 | 0,349 | 0,328 | 0,408 | 0,410 | 0,322 | 0,413 | 0,409 | 0,389 | 0,364 | 0,632 | 1,36 | 600 | |
| | | | | | 0,312 | 0,310 | | 0,373 | 0,412 | | 0,341 | 0,404 | | | | | | | |
| 6 | 3,198 | 2,697 | 3,19 | 1,41 | 0,265 | 0,411 | 0,418 | 0,372 | 0,408 | 0,419 | 0,275 | 0,402 | 0,406 | 0,414 | 0,389 | 0,582 | 1,36 | 599 | |
| | | | | | 0,282 | 0,424 | | 0,376 | 0,430 | | 0,293 | 0,409 | | | | | | | |
| 7 | 3,149 | 2,722 | 3,18 | 1,41 | 0,254 | 0,412 | 0,410 | 0,319 | 0,398 | 0,418 | 0,256 | 0,424 | 0,425 | 0,418 | 0,393 | 0,575 | 1,36 | 600 | |
| | | | | | 0,267 | 0,408 | | 0,319 | 0,438 | | 0,295 | 0,426 | | | | | | | |

Tabel 2. Data Uji PEB U_3Si_2 -AI

| No | Ketebalan, mm | | | Ketebalan kelongsong sebelum pikling, mm | | | | | | | | | | | | Ketebalan stl pikling, mm | | | Panjang PEB, mm |
|----|---------------|-------|-------|--|----------------|-------|-------|-------------|-------|-------|-----------------|-------|-------|--------|-------|---------------------------|------|-----|-----------------|
| | Frame | Cover | IEB | PEB | Sisi jauh (SJ) | | | Tengah (TG) | | | Sisi dekat (SD) | | | rerata | Kel | Meat | PEB | | |
| | | | | | Min | Xrt | Xrt | Min | Xrt | Xrt | Min | Xrt | Xrt | | | | | | |
| 1 | 3,166 | 2,728 | 3,160 | 1,41 | 0,392 | 0,450 | 0,432 | 0,340 | 0,406 | 0,416 | 0,356 | 0,434 | 0,424 | 0,424 | 0,399 | 0,562 | 1,36 | 600 | |
| | | | | | 0,310 | 0,414 | 0,426 | 0,363 | 0,426 | 0,413 | 0,324 | 0,413 | | | | | | | |
| 2 | 3,176 | 2,709 | 3,190 | 1,42 | 0,359 | 0,414 | 0,415 | 0,357 | 0,407 | 0,422 | 0,326 | 0,408 | 0,415 | 0,417 | 0,387 | 0,586 | 1,36 | 597 | |
| | | | | | 0,362 | 0,416 | 0,436 | 0,384 | 0,436 | 0,422 | 0,361 | 0,422 | | | | | | | |
| 3 | 3,178 | 2,703 | 3,150 | 1,42 | 0,349 | 0,417 | 0,418 | 0,346 | 0,398 | 0,414 | 0,362 | 0,423 | 0,421 | 0,417 | 0,387 | 0,586 | 1,36 | 598 | |
| | | | | | 0,361 | 0,418 | 0,429 | 0,333 | 0,429 | 0,418 | 0,343 | 0,418 | | | | | | | |
| 4 | 3,111 | 2,704 | 3,140 | 1,41 | 0,368 | 0,405 | 0,408 | 0,349 | 0,396 | 0,406 | 0,358 | 0,419 | 0,420 | 0,411 | 0,386 | 0,588 | 1,36 | 599 | |
| | | | | | 0,369 | 0,411 | 0,415 | 0,380 | 0,415 | 0,406 | 0,376 | 0,420 | | | | | | | |
| 5 | 3,118 | 2,707 | 3,170 | 1,41 | 0,372 | 0,419 | 0,429 | 0,342 | 0,400 | 0,402 | 0,355 | 0,411 | 0,428 | 0,419 | 0,394 | 0,571 | 1,36 | 600 | |
| | | | | | 0,382 | 0,439 | 0,403 | 0,361 | 0,403 | 0,401 | 0,378 | 0,444 | | | | | | | |
| 6 | 3,122 | 2,698 | 3,150 | 1,40 | 0,358 | 0,406 | 0,411 | 0,350 | 0,383 | 0,401 | 0,361 | 0,417 | 0,416 | 0,409 | 0,389 | 0,582 | 1,36 | 604 | |
| | | | | | 0,371 | 0,416 | 0,418 | 0,368 | 0,418 | 0,401 | 0,362 | 0,415 | | | | | | | |
| 7 | 3,143 | 2,688 | 3,160 | 1,40 | 0,347 | 0,404 | 0,414 | 0,337 | 0,407 | 0,426 | 0,335 | 0,399 | 0,408 | 0,416 | 0,396 | 0,569 | 1,40 | 600 | |
| | | | | | 0,372 | 0,423 | 0,444 | 0,411 | 0,444 | 0,417 | 0,342 | 0,417 | | | | | | | |