

ISSN 1907 – 2635
261/AU1/P2MBI/05/2010
(Masa berlaku Akreditasi s/d. Mei 2012)

Pembuatan Pelat Elemen Bakar Mini UMo-Al
Dengan Densitas Uranium 6 Dan 7 gU/cm³

(Supardjo, Agoeng K, Aslina Br. Ginting).

PEMBUATAN PELAT ELEMEN BAKAR MINI UMo-Al DENGAN DENSITAS URANIUM 6 DAN 7 gU/cm³

Supardjo, Agoeng K, Aslina Br. Ginting.

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir / PTBN

suparjo@batan.go.id

(Diterima 25-7-2011, disetujui 7.10-2011)

ABSTRAK

PEMBUATAN PELAT ELEMEN BAKAR MINI U-Mo/Al DENGAN DENSITAS URANIUM 6 DAN 7 gU/cm³. Pembuatan PEB mini UMo-Al bertujuan untuk pengembangan bahan bakar U₃Si₂/Al dengan uranium pengayaan rendah (<20% U²³⁵). Paduan U-7Mo, U-8Mo dan U-9Mo dibuat dengan teknik peleburan menggunakan tungku busur listrik pada kondisi: media gas Ar, arus 150 A, dan setiap paduan dilakukan peleburan dengan 5 kali pengulangan. Ingot paduan U-7Mo hasil peleburan dibuat serbuk hingga diameter partikel serbuk <125 µm. Selanjutnya ditimbang serbuk U-7Mo dan matriks Al dengan perbandingan sesuai untuk densitas uranium 6 dan 7gU/cm³, dicampur dan dibentuk menjadi inti elemen bakar (IEB) mini U-7Mo/Al dengan pengepresan pada tekanan 50 bar. IEB U-7Mo/Al dimasukkan kedalam lubang *frame* dan kedua sisinya ditutup dengan *cover*, kemudian pada keempat sisi sambungannya diikat dengan las TIG sehingga membentuk paket rol. Paket rol diubah menjadi pelat elemen bakar (PEB) mini U-7Mo/Al dengan pengerolan panas pada temperatur 425 °C dan dilanjutkan pengerolan dingin hingga ketebalan ± 1,40 mm. Hasil pengujian/analisis menunjukkan bahwa: ingot paduan U-Mo cukup homogen, ulet, tidak terdapat lapisan oksida dipermukaannya dan kekerasan meningkat seiring kenaikan kadar Mo. Serbuk U-7Mo berbentuk pipih dan tidak beraturan dengan berat jenis 16,336 g/cm³. Inti elemen bakar mini U-7Mo/Al densitas uranium 6 dan 7 gU/cm³ hasil pengepresan berdimensi 25 x15 x ±2,98 mm dan 25 x15 x ±3,00 mm, tidak terdapat cacat dalam bentuk retak/crack. Data radiografi PEB. U-7Mo/Al terlihat bahwa distribusi uranium di dalam *meat* cukup homogen, terjadi pemanjangan pelat ±5,76 kali dengan tebal kelongsong merata pada SJ, TG dan SD berturut-turut 0,407 mm, 0,440 mm, dan 0,425 mm dengan tebal minimum 0,302 mm di SJ. Dari seluruh data uji menunjukkan bahwa pembuatan PEB mini U-Mo/Al diperoleh hasil yang cukup baik sehingga dapat digunakan sebagai acuan untuk penelitian lebih lanjut.

Kata Kunci: paduan U-Mo, bahan bakar dispersi, inti elemen bakar U-Mo/Al, pelat elemen bakar U-Mo/Al

ABSTRACT

THE MANUFACTURE OF THE UMo-Al MINI FUEL PLATE WITH URANIUM DENSITY 6 AND 7 gU/cm³. The manufacture of U-Mo/Al mini fuel plate was performed in order to develop U3Si2/Al fuel with low enrichment uranium (<20% U²³⁵). The U-7Mo, U-8Mo and U-9Mo alloys were made by smelting techniques using an electric arc furnace at the conditions: Ar gas media, current 150 A, and each alloy smelting was done with 5 repetitions. The U-7Mo alloy remelting was made of powder to the powder particle diameter <125 µm. Furthermore the U-7Mo powders and Al matrix were weighed with a ratio corresponding to 6 and 7gU/cm³ uranium density, mixed and formed into a U-7Mo/Al mini fuel core by pressing at a pressure of 50 bar. The U-7Mo/Al mini fuel core was incorporated into the frame hole and both sides were covered with a cover, and then on the fourth side seams was fastened with TIG welding to form a roll package. Package roller was converted into U-7Mo/Al mini fuel plate by hot rolling at a temperature of 425°C and continued cold rolling up to a thickness of ± 1.40 mm. Test results of analysis indicated that: ingots U-Mo alloys quite homogeneous, ductile, there was no oxide layer on the surface and the hardness increased with Mo content. The U-7Mo powders and irregularly shaped flat had specific gravity of 16.336 g/cm³. The U-7Mo/Al mini fuel core of a uranium which had density of 6 and 7gU/cm³ as a result of the pressing had dimensions of (25 x15 x ± 2.98) mm and (25 x15 x ± 3.00) mm, there was no defect in the form of crack. Radiographic data of U-7Mo/Al mini fuel plate was seen that the distribution of uranium in the meat fairly homogeneous, there was a lengthening plate ± 5.76 times the average cladding thickness on the SJ, TG and SD respectively 0.407 mm, 0.440 mm and 0.425 mm with a minimum thickness 0.302 mm at SJ. From all the test data showed that the manufacture of U-Mo/Al mini fuel plate had shown good results so it could be used as reference for further research.

Free Terms: U-Mo alloy, dispersion fuel, the U-Mo/Al fuel core, the U-Mo/Al fuel plate.

I. PENDAHULUAN

Pengembangan teknologi produksi bahan bakar nuklir untuk bahan bakar reaktor riset berlangsung sangat pesat guna mendapatkan bahan bakar baru yang memiliki unjuk kerja baik, aman dan ekonomis. Berkaitan dengan anjuran penggunaan bahan bakar dengan uranium pengayaan rendah (<20%U-235), maka pemilihan penggunaan material baru sangat diperlukan. Konversi penggunaan uranium di dalam bahan bakar nuklir untuk reaktor riset dari pengayaan tinggi (> 90% U²³⁵) ke pengayaan rendah (< 20% U²³⁵) merupakan program internasional yang dicanangkan di USA tahun 1978[1]. Tujuan penggunaan uranium pengayaan rendah tersebut adalah untuk menghindari penyalahgunaan penggunaan uranium pengayaan tinggi oleh orang-orang yang tidak bertanggung jawab untuk persenjataan. Hal ini sangat dihindari karena

dapat mengganggu kestabilan dunia. Sebagai kompensasi penggunaan bahan bakar dengan uranium pengayaan rendah (pada disain unit volume bahan bakar sama seperti pengayaan tinggi), maka diperlukan peningkatan jumlah uranium agar unjuk kerja reaktor dapat dipertahankan minimal sama seperti penggunaan bahan bakar uranium pengayaan tinggi. Untuk memenuhi perihal tersebut, maka penelitian dan pengembangan bahan bakar baru terus dilakukan dan sebagai alternatifnya adalah paduan uranium yang memiliki densitas tinggi dan mampu mempertahankan kristal γ -U selama proses iradiasi. Bahan bakar dengan struktur kristal γ -U, stabilitas di dalam reaktor dapat dipertahankan. Paduan uranium yang memiliki kecenderungan membentuk fasa γ -U antara lain: U-Cr, U-Mo, U-Nb, U-Re, U-Ru, U-Ti, U-V dan U-Zr[2]. Diantara paduan tersebut yang memiliki rentang fasa γ relatif luas adalah U-Mo sehingga paduan tersebut dipilih sebagai kandidat bahan bakar di masa datang.

Bahan bakar dispersi U-Al_x/Al dan U₃O₈/Al yang semula menggunakan uranium pengayaan tinggi, dengan beralihnya penggunaan uranium pengayaan rendah, densitas uranium maksimum yang dapat dicapai hanya 2,7 dan 3,2 gU/cm³. Selanjutnya menggunakan paduan U₃Si₂, tingkat muat uranium optimum yang dapat dicapai 4,80 gU/cm³[3]. Kelebihan penggunaan bahan bakar U₃Si₂/Al adalah mudah difabrikasi dan stabil selama iradiasi di dalam reaktor, namun kelemahan yang dihadapi adalah proses olah ulang gagal fabrikasi/bahan bakar bekas yang sangat sulit dan tingkat muat uraniumnya masih jauh dibawah 8 gU/cm³.

Paduan U-Mo memiliki berat jenis sekitar 16,4 g/cm³ (tergantung kadar Mo), tahan terhadap korosi, tampang lintang serapan neutron rendah, namun paduan bersifat ulet (*ductile*) sehingga sulit dibuat serbuk secara mekanik (*grinding mill/ball mill*). Berat jenis tersebut lebih tinggi dibandingkan dengan berat jenis paduan uranium/uranium oksida yang telah digunakan sebagai bahan bakar reaktor riset seperti U₃Si₂, U₃O₈, dan UAl_x yang masing-masing sebesar 12,2, 8,4, dan 6,7 g/cm³. Penggunaan U-Mo sebagai bahan bakar tipe dispersi, tingkat muat uranium di dalam *meat* pelat elemen bakar dapat ditingkatkan menjadi >8,0 gU/cm³[4]. Densitas tersebut sesuai dengan yang diperlukan reaktor terkait penggunaan uranium pengayaan rendah. Kelebihan lain paduan U-Mo sebagai bahan bakar adalah proses olah ulang lebih mudah dibandingkan bahan bakar U₃Si₂/Al.

Struktur kristal paduan U-Mo adalah bcc, pada suhu 1280 °C terjadi reaksi peritektik dengan fasa γ maksimum pada komposisi 40% Mo. Pada suhu yang lebih rendah (<648°C) terjadi keseimbangan reaksi eutektik antara fasa β (1,4% atom Mo) menjadi α (0,1% atom Mo) dan fasa δ_2 (8% atom Mo),

sedangkan keseimbangan antara fasa γ (21,5% atom) dengan α (<0,1% atom) dan δ_2 terjadi pada suhu 572 °C[5].

Paduan U-Mo dengan kandungan Mo antara 7 ~ 10% berat memiliki prospek yang sangat baik untuk digunakan sebagai bahan bakar nuklir dispersi dengan pengayaan uranium rendah[6]. Sebagai bahan bakar nuklir dispersi, maka paduan U-Mo yang berbentuk padat dan ulet harus diubah kedalam bentuk serbuk hingga diameter (\emptyset) partikel serbuk < 150 μm . Sifat ulet paduan U-Mo menyebabkan proses pembuatan serbuk sulit dilakukan dengan cara mekanik, sehingga hal ini merupakan suatu tantangan dan perlu pemilihan teknik yang tepat.

Metode proses pembuatan serbuk material yang bersifat ulet seperti U-Mo dapat dilakukan beberapa cara diantaranya: *Mechanical Crushing* (*milling*, *grinding* atau penambahan unsur pepadu untuk menambah kerapuhan, *cryogenic mechanical crushing*, *hydride-dehydride* dan proses atomisasi^[7]. Proses produksi serbuk U-Mo adalah dengan membuat dekomposisi partial fasa γ -U di dalam struktur selular. Struktur ini terdiri dari fasa α -U dan fasa γ -U diperkaya dengan Mo atau U_2Mo , dimana U_2Mo mula-mula berada pada batas butir (*grain boundary*) fasa γ -U kemudian akan tumbuh melalui pusat butir. Paduan hasil leburan dikondisikan dengan cara *annealing* sehingga diperoleh paduan U-Mo berstruktur selular.

Material berstruktur selular ini kemudian direaksikan dengan hidrogen menggunakan alat hidriding, maka fasa α -U ditransformasi menjadi UH_3 yang terletak di batas butir sehingga bahan mudah pecah dan terburai menjadi bongkahan-bongkahan antar butir. Melalui proses dehidriding maka fasa γ -U akan diperoleh kembali dengan proses termal, yaitu mengatur suhu proses pada fasa γ [8]. Paduan U-Mo yang diperoleh dalam bentuk butiran kasar kemudian digerus menjadi serbuk halus dengan diameter ukuran partikel <150 μm . Serbuk U-Mo yang telah memenuhi persyaratan tersebut dapat dilanjutkan untuk penelitian dalam bentuk pelat elemen bakar.

Pada penelitian ini dilakukan pembuatan PEB U-Mo/Al, yang diawali dari pembuatan paduan U-7Mo, U-8Mo, dan U-9Mo dengan teknik peleburan menggunakan tungku busur listrik, namun untuk pembuatan serbuk hingga pelat elemen bakar hanya menggunakan paduan U-7Mo. Pembuatan serbuk dari ingot paduan U-7Mo dilakukan dengan cara mekanik (dikikir), pembuatan inti elemen bakar campuran serbuk U-7Mo dan serbuk matriks Al dengan pengepresan, sedangkan pembuatan PEB mini U-Mo/Al dengan pengerolan panas dan dingin. Diharapkan dengan proses tersebut diperoleh data uji PEB mini U-7Mo/Al yang memenuhi persyaratan bahan bakar tipe pelat dengan tebal kelongsong $0,38^{+0,05}_{-0,08}\text{mm}$, sehingga dapat digunakan sebagai pedoman

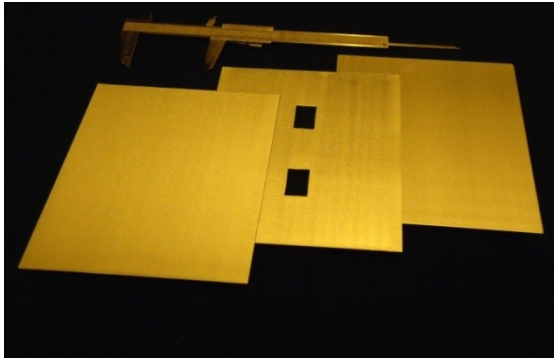
penelitian lebih lanjut untuk mendapatkan PEB U-7Mo/Al yang memenuhi spesifikasi bahan bakar reaktor riset tipe pelat dan siap uji iradiasi di RSG-GAS.

II. TATA KERJA

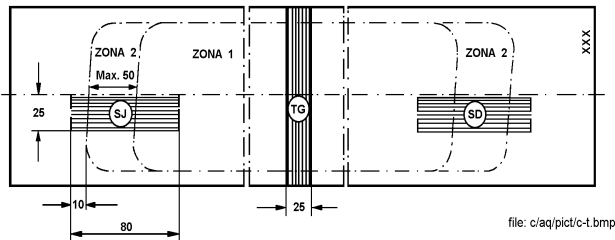
Penelitian menggunakan bahan baku logam uranium depleksi, logam Mo dan serbuk Al sebagai matriks. Logam uranium, Mo dan serbuk Al dianalisis untuk mengetahui kemurnian dan unsur logam pengotornya. Data analisis logam U dan Mo digunakan untuk menghitung komposisi logam U dan Mo untuk pembuatan paduan U-7Mo. Paduan U-7Mo (93 %U +7%Mo) dibuat dengan teknik peleburan menggunakan tungku busur listrik, bermedia gas argon) dan arus 150 Amper. Setiap paduan dilebur dengan lima kali penulangan agar diperoleh paduan U-7Mo yang homogen. Ingot U-7Mo hasil peleburan dibuat serbuk dengan cara mekanik (dikikir), dan serbuk yang diperoleh diayak menggunakan ayakan berukuran lubang 125 μm . Serbuk U-7Mo dianalisis kadar U, unsur penyusun lainnya, dan berat jenis dengan metode piknometri. Data analisis digunakan untuk menentukan komposisi campuran serbuk antara U-7Mo dan matriks Al untuk densitas uranium 6 dan 7 gU/cm³. Perbandingan berat serbuk U-Mo dan matriks Al dihitung berdasar data analisis serbuk yang meliputi: berat jenis U-Mo dan Al, kadar U dalam U-Mo, kadar U dan U²³⁵ nya. Campuran serbuk U-Mo dan matriks Al dibentuk menjadi inti elemen bakar (IEB) dengan cara pengepresan pada tekanan tinggi dan IEB hasil pengepresan ditimbang, diukur homogenitas uraniumnya dengan teknik Radiografi dan ketebalannya. Selanjutnya IEB dimasukkan kedalam *Frame* dan kedua sisi lainnya ditutup dengan *cover* paduan Aluminium (Gambar 1) serta pada beberapa bagian sisi sambungannya diikat dengan las TIG (Tungsten Inert Gas) membentuk paket rol.

Selanjutnya IEB dimasukkan kedalam *Frame* dan kedua sisi lainnya ditutup dengan *cover* paduan Aluminium serta pada beberapa bagian sisi sambungannya diikat dengan las TIG membentuk paket rol. Paket rol diubah menjadi PEB dengan pengerolan panas pada temperatur 425 °C (empat tahap), dan dilanjutkan pengerolan dingin hingga ketebalan sesuai standar PEB. Pelat hasil pengerolan dilakukan pelurusan, pemotongan dan pengujian menggunakan radiografi sinar-X untuk mengetahui bentuk dan dimensi meat, white spots dan homogenitas distribusi uranium dan tebal kelongsongnya. Pengambilan sampel untuk pengujian tebal kelongsong PEB mini U-7Mo/Al seperti ditunjukkan pada Gambar 2, kemudian dimounting, diampelas dan

diamati/diukur tebal kelongsongnya dengan mikroskop optik pada jarak pengukuran setiap mili meter^[9].



Gambar 1. *Frame*, dua *Cover*



Gambar 2. Posisi pengambilan sampel uji tebal kelongsong U-Mo/Al
SD : Sisi dekat (ujung PEB dekat nomor identitas), TG : Tengah, SJ :
Sisi jauh

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bahan baku logam U depleksi dan Mo sebelum dibuat paduan terlebih dahulu dianalisis untuk mengetahui kemurnian dan unsur-unsur penyerta yang terkandung di dalamnya. Kadar uranium depleksi dianalisis dengan metode titrimetri menggunakan alat Titroprosesor dan diperoleh kadar uranium 99,94%, sedangkan unsur logam pengotor dianalisis menggunakan AAS diperoleh Fe= 8,25 ppm dan Mg= 2,49 ppm. Logam Mo yang merupakan logam pepadu dianalisis menggunakan AAS dan diperoleh logam Mo memiliki kemurnian 99,95% dan unsur logam penyerta terdiri dari: Cd=1,68 ppm, Fe=35,07 ppm, Co=11,30 ppm, Mn=3,14 ppm, Mg 0,27 ppm, Cu=7,25 ppm, Ni=60,94 ppm, dan Al= 9475,23 ppm. Kemurnian logam U dan Mo dan unsur logam penyerta di dalam kedua bahan tersebut cukup baik dan

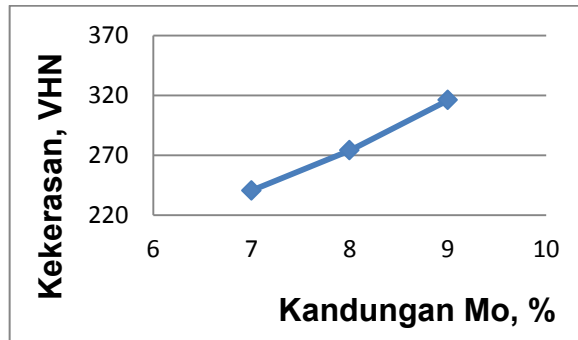
memenuhi persyaratan digunakan sebagai bahan bakar. Kadar uranium digunakan sebagai dasar untuk menghitung komposisi campuran antara uranium dan Mo untuk pembuatan paduan U-Mo. Berdasar kadar uranium dan hasil perhitungan komposisi antara uranium dan Mo untuk membuat paduan U-Mo adalah sebagai berikut: U-7Mo (20,0515g U dan 1,4816g Mo), U-8Mo (20,0085g U dan 1,7356g Mo) dan U-9Mo (20,0000g U dan 1,9760g Mo).

Pengamatan secara visual ingot paduan U-Mo hasil peleburan cukup homogen dan pada permukaan tidak teramati adanya lapisan oksida (Gambar 3). Ingot sangat ulet sehingga sulit dibuat serbuk dengan cara mekanik seperti ring-mill/ball-mill.

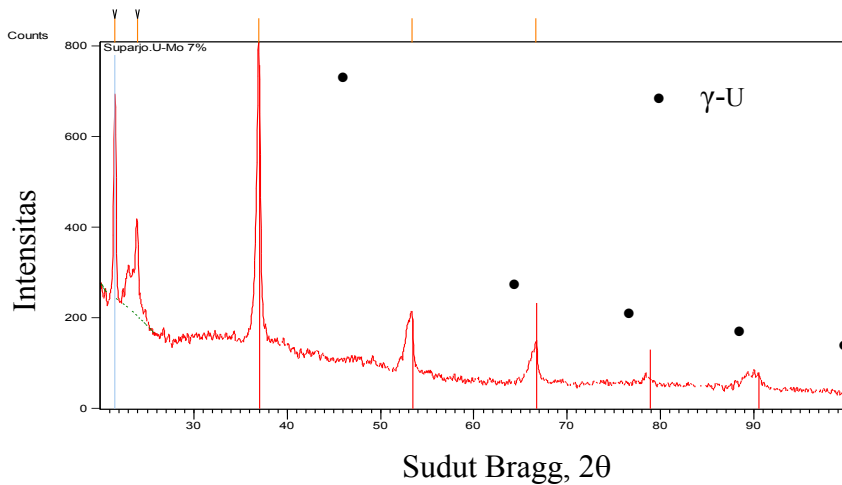


Gambar 3. Ingot paduan U-Mo hasil peleburan

Pengujian kekerasan ingot dengan metoda Vickers diperoleh bahwa ingot paduan U-7Mo, U-8Mo dan U-9Mo memiliki kekerasan rerata berturut-turut 240,4 VHN, 274,0 VHN dan 316,0 VHN dan dituangkan dalam Gambar 4. Makin tinggi kadar Mo di dalam paduan, kekerasannya cenderung naik. Secara teoritis kenaikan kekerasan akan menurunkan keuletannya, namun demikian penurunan keuletannya tidak signifikan. Pola difraksi ingot paduan U-7Mo hasil peleburan adalah fasa γ berstruktur bcc dengan sudut difraksi sama seperti pola difraksi serbuk U-7Mo hasil proses atomisasi yang dilakukan oleh Chang-Kyu Kim et.al[10]. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi proses pembuatan paduan U-7Mo dengan teknik peleburan dihasilkan paduan yang cukup baik.



Gambar 4. Kekerasan ingot paduan UMo



Gambar 5. Pola difraksi sinar-X paduan U7Mo

Paduan U-Mo berstruktur bcc dan sangat ulet sehingga sulit dibuat serbuk dengan metoda milling, baik *ring-mill/grinding-mill*. Pada penelitian ini pembuatan serbuk dilakukan dengan penggerusan menggunakan kikir di dalam *glove box* bermedia gas argon. Partikel serbuk yang diperoleh dipisahkan menggunakan ayakan standard ASTM berukuran lubang 125 μm dan 40 μm dan serbuk yang diperoleh seperti ditunjukkan pada Gambar 5. Serbuk hasil pengikiran ingot paduan U-7Mo terlihat pipih dan hasil analisis menggunakan alat Titroprocessor diperoleh kadar U sebesar 93,0 %. Kadar unsur pengotor dianalisis menggunakan AAS seperti ditampikan pada Tabel 1 dan 2.

Tabel 1.
 Data hasil analisis logam U, Mo, dan Al

No	Unsur pengotor	Kadar Dalam Sampel (ppm)			Keterangan
		U logam	Mo stripe	Serbuk Al	
1	Cd	ttd	1.68	ttd	ttd=<0,2
2	Fe	8.25	35.07	288,00	
3	Co	ttd	11.30	ttd	ttd=<0,5
4	Mn	ttd	3.14	20,00	ttd=<0,2
5	Mg	2.49	0.27	30,00	
6	Cu	ttd	7.25	18,40	ttd=<0,2
7	Cr	ttd	ttd	ttd	ttd=<0,5
8	Ni	ttd	60.94	ttd	ttd=<0,5
9	Al	ttd	9475.23	ttd	ttd=<5,0
10	Si	ttd	ttd	00,00	ttd=<15,0
Kadar U		99,94			%

Kadar Fe sebesar 2631,339 ppm, masih jauh diatas batas yang dipersyaratkan dalam bahan bakar reaktor riset, yaitu campuran Fe, Ni dan Cr harus <1000 ppm. Tingginya kadar Fe diprediksi berasal dari material kikir saat proses pembuatan serbuk, sehingga metode pembuatan serbuk dengan cara ini tidak direkomendasikan. Namun demikian serbuk yang dihasilkan tetap dilanjutkan untuk mengetahui karakter IEB dan PEB mengingat adanya impuritas Fe yang melebihi spesifikasi tidak berpengaruh terhadap proses fabrikasinya.



Gambar 5. Serbuk U-7Mo hasil pengikiran

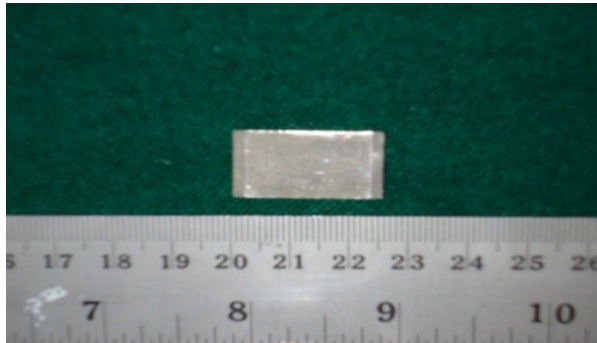
Tabel 2.

Data analisis unsur logam pengotor dalam serbuk U-7Mo

No	Unsur logam	Kadar ($\mu\text{g/g}$)	Kadar %
1	Mg	14,722	0,00147
2	Ni	36,750	0,00368
3	Fe	2631,339	0,26313
4	Cr	12,603	0,00126
5	Co	0,000	0,00000
6	Ca	139,955	0,14000
7	Al	288,355	0,02880
8	Cd	3,919	0,00039
9	Zn	45,900	0,00459
10	Cu	34,647	0,00346

Data uji/analisis kadar U dan densitas serbuk U-7Mo ($16,336 \text{ g/cm}^3$) serta densitas serbuk matriks Al ($2,70 \text{ g/cm}^3$) digunakan untuk perhitungan porsi timbang berat serbuk U-Mo dan Al dalam pembuatan bahan bakar dispersi dengan densitas uranium 6 dan 7 gU/cm^3 seperti ditampilkan pada Lampiran 1. Dimensi inti elemen bakar (IEB) yang akan dibuat disesuaikan dengan disain dimensi *dies* yaitu ($25 \times 15 \times 1,3$)mm, sedangkan porositas yang terbentuk di dalam IEB/*meat* diasumsikan sebesar 8 % (spesifikasi antara 3–14 %). Hasil hitung diperoleh bahwa dengan menaikkan densitas uranium, jumlah serbuk U-Mo naik sedangkan serbuk matriks menurun. Pembentukan IEB U-7Mo densitas uranium 6 dan 7 gU/cm^3 dilakukan dengan pengepresan pada tekanan 50 bar terhadap campuran serbuk U-7Mo dan serbuk matriks Al (sesuai porsi masing-masing), dihasilkan lempengan seperti ditunjukkan Gambar 6. Pengamatan secara visual terhadap kedua IEB U-Mo-Al tidak ditemui adanya cacat dalam bentuk retak/pecah dan distribusi bahan bakar cukup homogen. Hasil uji dimensi tebal untuk IEB U-Mo/Al dengan densitas uranium 6 gU/cm^3 adalah 3,01 mm, 2,98 mm, dan 2,96 mm (rerata = 2,98 mm), sedangkan untuk densitas uranium 7 gU/cm^3 mempunyai ketebalan 2,98 mm, 3,05 mm, dan 2,99 mm (rerata = 3,00 mm). Ketebalan kedua IEB U-Mo/Al masih terlalu tipis bila dibandingkan ketebalan standar yaitu $3,15 \pm 0,05$ mm. Ditinjau dari jumlah uraniumnya sudah memenuhi sesuai densitas uraniumnya sehingga untuk meningkatkan ketebalan agar diperoleh ketebalan sesuai standar dan tidak merubah densitas uraniumnya, maka disarankan untuk

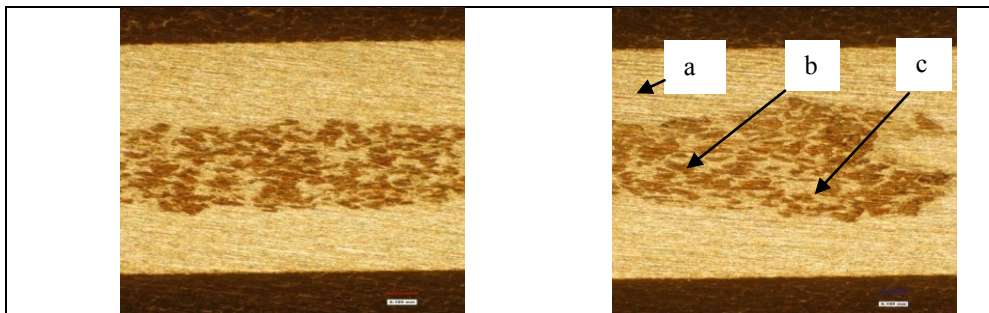
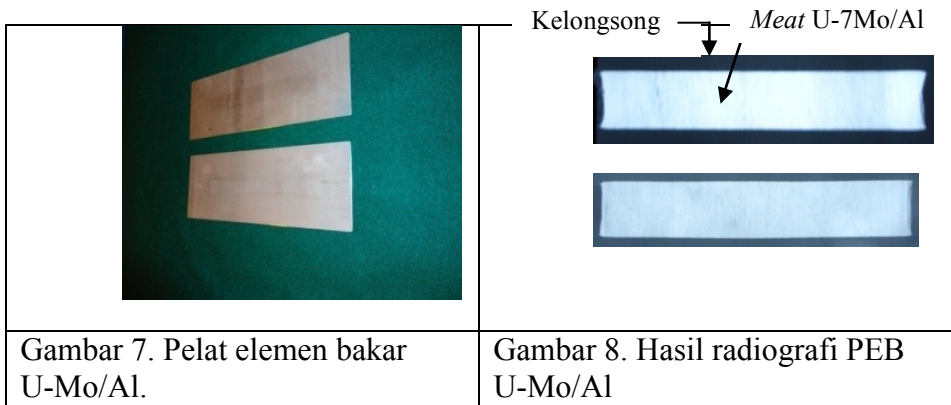
penelitian berikutnya dilakukan penambahan matriks Al yang jumlahnya ditentukan dengan perhitungan.



Gambar 6. IEB U-Mo/Al hasil pengepresan

Inti elemen bakar U-Mo/Al dimasukkan di dalam *frame* kemudian kedua sisinya ditutup dengan dua pelat *cover* dan diikat beberapa titik pada keempat sisi sambungannya menggunakan las TIG membentuk paket rol. Hasil pengukuran tebal paket rol sebesar 8,54 mm, dan dibentuk menjadi PEB U-Mo/Al dengan pengerolan (empat tahap) pada temperatur 425 °C dan diperoleh tebal PEB 1,4 mm. Pelat Elemen Bakar hasil pengerolan ditunjukkan pada Gambar 7, dan hasil radiografi PEB ditunjukkan pada Gambar 8. Secara visual permukaan PEB cukup baik dan tidak teramati adanya crack/retak (Gambar 7). Pada proses pengerolan terjadi pemanjangan PEB (*kelongsong* dan *meat*) sesuai arah rol, sedangkan lebar PEB tetap (tidak terjadi perubahan). Hasil radiografi PEB U-Mo/Al mini yang ditampilkan pada Gambar 8, terlihat bahwa distribusi uranium di dalam *meat* bahan bakar cukup homogen dengan bentuk ujungnya relatif simetri, sedangkan panjang *meat* untuk PEB densitas uranium 6 dan 7 gU/cm³ masing-masing menjadi 143 mm dan 144 mm. Bila dibandingkan dengan panjang IEB sebelum dirol, maka terjadi pemanjangan sekitar 5,76 kali. Pemanjangan *meat* ini digunakan untuk memprediksi proses pembuatan PEB dengan ukuran sesuai dimensi yang digunakan sebagai bahan bakar tipe pelat.

Posisi pengambilan sampel untuk uji tebal kelongsong PEB mini U-7Mo/Al seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Foto irisan PEB U-7Mo/Al densitas uranium 7 gU/cm³ pada sisi dekat (SD) dan bagian tengah yang ditampilkan pada Gambar 9, terlihat bahwa secara visual distribusi uranium di dalam *meat* cukup homogen, dimana bahan bakar U-Mo dikelilingi oleh matriks Al.



Gambar 9. Irisan PEB U-Mo/Al, bagian TG dan SD. Keterangan: (a) Kelongsong, (b) U-7Mo, (c) Matriks Al

Ketebalan *meat* pada bagian tengah PEB cukup merata, sedangkan dibagian ujung terbentuk *dog bone*, sehingga pada daerah ini kelongsong menjadi tipis. Ketebalan kelongsong seluruh PEB diukur menggunakan mikroskop optik yang dilengkapi fasilitas ukur dan diperoleh data seperti ditunjukkan pada Tabel 3. Secara keseluruhan terlihat bahwa tebal kelongsong merata PEB pada bagian tengah lebih tebal dibanding kedua ujung lainnya. Kelongsong pada bagian tengah memiliki tebal merata 0,440 mm, sisi dekat 0,425 mm dan sisi jauh 0,407 mm dengan tebal minimum 0,302 mm pada sisi jauh. Tebal kelongsong minimum 0,302 mm masih diatas batas minimum yang diijinkan dalam bahan bakar tipe pelat yaitu sebesar 0,25 mm[11]. Oleh karena itu bila didasarkan pada tebal kelongsongnya, maka dengan menggunakan bahan bakar berbasis U-Mo, densitas uranium masih berpeluang untuk ditingkatkan $> 7\text{gU/cm}^3$.

Tabel 3.
Data Uji Tebal kelongsong PEB U-Mo/Al densitas uranium 7 gU/cm³

Tebal Kelongsong Sisi Jauh, mm		Tebal Kelongsong Tengah, mm		Tebal Kelongsong Sisi Dekat, mm	
Atas	Bawah	Atas	Bawah	Atas	Bawah
0,589	0,330	0,443	0,487	0,357	0,394
0,302	0,458	0,449	0,420	0,376	0,446
0,474	0,335	0,362	0,471	0,473	0,510
0,335	0,527	0,548	0,463	0,432	0,425
0,512	0,332	0,354	0,471	0,424	0,479
0,351	0,460	0,525	0,396	0,407	0,394
0,494	0,358	0,368	0,467	0,363	0,476
0,358	0,413	0,517	0,412	0,406	0,393
0,459	0,352	0,408	0,490	0,357	0,469
0,370	0,391	0,501	0,403	0,510	0,430
0,401	0,403	0,373	0,467	0,385	0,461
0,442	0,390	0,452	0,378	0,464	0,304
0,396	0,438	0,450	0,467	0,418	0,484
0,420	0,351	0,480	0,395	0,491	0,376
0,419	0,412	0,362	0,442	0,401	0,476
0,410	0,333	0,483	0,355	0,448	0,339
				0,363	0,511
				0,466	0,381
Tebal rerata. 0,421	Tebal rerata. 0,393	Tebal rerata. 0,442	Tebal rerata. 0,437	Tebal rerata. 0,419	Tebal rerata. 0,430
0,407		0,440		0,425	
Tebal min. 0,302	Tebal min. 0,330	Tebal min. 0,354	Tebal min. 0,355	Tebal min. 0,357	Tebal min. 0,304
Keterangan: Tebal min = tebal minimum					

IV. KESIMPULAN

1. Pembuatan paduan U-Mo dengan cara peleburan menggunakan tungku busur listrik dengan arus 150 Amper, media gas argon dan setiap peleburan dilakukan 5 kali pengulangan diperoleh ingot paduan yang cukup homogen dan tidak terdapat lapisan oksida dipermukaannya. Ingot paduan U-Mo sangat ulet dan pembuatan serbuk dengan cara dikikir menyebabkan partikel serbuk cenderung pipih dan kadar Fe cukup tinggi = 2631,339 ppm (persyaratan Fe & Ni maks. 1000 ppm) yang diprediksi berasal dari material kikir.
2. Pembuatan IEB U-Mo/Al densitas 6gU/cm³ (7,598 gUMo + 1,679 g Al) dan 7gU/cm³ (8,865 gUMo + 1,469 g Al), masing-masing dipres pada tekanan 50 bar dan diperoleh IEB mini dimensi 25 x 15 x 2,98 mm untuk densitas U 6 gU/cm³ dan 25 x 15 x 3,00 mm untuk densitas U 7 gU/cm³.

Ketebalan kedua IEB tersebut secara visual distribusi uranium cukup homogen dan tidak terdapat adanya cacat.

3. Perolan panas pada temperatur 425 °C mereduksi dari tebal paket rol 8,63 mm menjadi 1,65 mm, dan dilanjutkan perolan dingin menjadi 1,40mm. Film hasil uji radiografi teramati distribusi uranium di dalam meat cukup homogen dan data uji ketebalan PEB pada sisi dekat 0,4247 mm, tengah 0,4394mm dan sisi jauh 0,4067 mm dengan ketebalan minimum 0,302 mm pada sisi jauh.

V. UCAPAN TERIMA KASIH

Atas terlaksananya penelitian percobaan pembuatan PEB mini U-Mo/Al dan selesainya tulisan ini, ucapan terima kasih disampaikan kepada seluruh pegawai PTBN atas segala partisipasinya. Semoga tulisan ini bermanfaat bagi pembaca dan pengembangan bahan bakar reaktor riset dimasa datang.

VI. DAFTAR PUSTAKA

1. Savornin and Fanjas, Y.R. (1982, November 8-10). Contribution To The RERTR Program Status of Development. Proceedings of the International Meeting on RERTR. CERCA, Argonne, Illinois.
2. Ki Hwan Kim et.al. (1996). Development of High Loading Alloy Fuel by Centrifugal Atomization". RERTR. Korea.
3. U.S. Nuclear Regulatory Commission (1988, July). Safety Evaluation Report Related to the Evaluation Of Low Enriched Uranium Silicide Aluminium Dispersion Fuels for Use in Non Power Reactors. (NUREG-1313). U.S.Nuclear Regulatory Commission
4. Hofman, G.L, et. al. (1999, October 3-8). Initial Assesment of Radiation Behavior of Very High Density Lows Enriched Uranium Fuels. RERTR. Budapest, Hungary.
5. IVANOV et.al. (1983). "Phase Diagram of Uranium alloys". New Delhi, Amerind Publishing Co PVT.LTD..
6. Clark, C.R. et.al. (2007, September 23-27). Production and Characterization Of Atomized U-Mo powder By The Rotating Electrode Process". RERTR. Czech Republic.
7. Solonin, M.I, et.al. (2000, October 1-6). Development of the Method of High Density Fuel Comminution by Hydride-Dehydride Processing. International RERTR Meeting Program. Las Vegas, Nevada.

8. Fabio Branco Vaz De Oliveira, et.al. (2007, September 23-27) Powder Formation of γ -Uranium-Molybdenum Alloys Via Hydration-Dehydration. RERTR. Czech Republic.
9. PT. Batan Teknologi (persero). Proses Produksi bahan bakar dispersi U_3Si_2/Al dengan uranium pengayaan $\pm 19,75\% U^{235}$.
10. Chang-Kyu Kim et,al. (1999, October 4). An Investigation on γ -U Phase stability and Thermal Compatibility of dispersion Fuel Meats Prepared with Atomized U-16 at.%Mo, U-14at.%Moat-2at.%Ru and U-14at.%Mo-2at%Os. RERTR. AEKI. Reactor Fuel Assemblies. RRR SAR. ANSTO. Hungary.
11. Jurgen Deckers. (1985, October 14-16). Minimum Cladding Thickness of Material Test Reactor Fuel Plate. RERTR,Netherlands.