

PENGEMBANGAN TEKNOLOGI BAHAN BAKAR REAKTOR RISET BERBASIS U-Mo/Al [FABRIKASI DAN PENGUJIAN PELAT ELEMEN BAKAR U-Mo-xM (M=Ti, Zr, Si)]

Supardjo, Boybul, Agoeng K, Maman Kartaman, Isfandi, Hendro Wahyono, Suhatno, Yatno Dwi Agus Susanto, Suyoto, Susworo, Setia Permana, Dadang, Guswardani, Purwanta, Suhardyo, Iis Haryati, Rahmiati, Nining Sumarni, Nudia Barenzani
Pusat Teknologi Bahan bakar Nuklir

ABSTRAK

Percobaan pembuatan pelat elemen bakar dispersi U-7Mo-xM/Al tipe pelat dalam ukuran mini telah dilakukan dalam rangka mendapatkan parameter proses yang optimum. Alur proses dimulai dari pembuatan paduan U-7Mo-xM menggunakan uranium deplesi, dengan peleburan, dilanjutkan pembuatan serbuk U-7Mo-xM dengan hidriding-dehidriding-grinding mill, IEB U-7Mo-xM/Al dengan pengepresan, dan PEB U-7Mo-xM/Al dengan pengerolan. Produk dari setiap akhir tahapan proses dikenai pengujian/analisis sesuai dengan jenis uji yang diterapkan pada produksi bahan bakar dispersi tipe pelat, kemudian hasilnya dibandingkan dengan spesifikasi. Dari data uji menunjukkan bahwa kondisi proses yang optimal pada pembuatan paduan U-7Mo-xM dengan peleburan pada arus listrik 150 ampere dan 5 kali pengulangan. Pembuatan serbuk U-7Mo-xM dengan proses hidriding pada temperatur 350°C hingga temperatur kamar dan dehidriding pada temperatur 500°C selama 10 jam, dilanjutkan pembuatan serbuk di dalam *glove box* bermedia gas argon. Pengepresan campuran serbuk U-7Mo-xM dan serbuk Al dengan tekanan antara 10-20 bar. Pengerolan pada temperatur 425°C dengan 4 tahap penurunan ketebalan diperoleh PEB U-7Mo-xM/Al sesuai dengan spesifikasi, kecuali ketebalan kelongsong masih terdapat beberapa titik pengukuran yang memiliki ketebalan <0,25 mm sehingga perlu diteliti lebih lanjut. Data proses tersebut dipakai sebagai dasar desain untuk pembuatan sampel uji iradiasi PEB U-7Mo/Al mini dengan uranium pengkayaan 19,75%²³⁵U. Hasil desain berupa PEB U-7Mo/Al dengan menempatkan *meat* pada bagian atas. Uji iradiasi menggunakan stringer dan setiap stringer berisi 3 (tiga) PEB U-7Mo/Al yang dirakit dengan menyisipkan, sedangkan 18 alur lainnya diisi pelat dummy yang dirakit dengan rol gencet. Iradiasi akan dilakukan di teras RSG-GAS hingga dicapai *burn-up* 60%.

Kata kunci : Bahan bakar reaktor riset, pelat elemen bakar U-7Mo-xM/Al, uji iradiasi

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Keberhasilan litbang bahan bakar U₃Si₂/Al densitas uranium 2,96 gU/cm³, memberikan motivasi untuk melanjutkan penelitian dengan densitas uranium yang lebih tinggi. Bahan bakar U₃Si₂/Al densitas uranium 4,8 dan 5,2 gU/cm³ juga telah berhasil difabrikasi dengan kualitas sesuai dengan spesifikasi bahan bakar RSG-GAS. Bahan bakar U₃Si₂/Al densitas uranium 4,8 gU/cm³ telah dilakukan uji iradiasi hingga *burn-up* 60% dan hasil uji secara tidak merusak menunjukkan *kinerja*/stabilitas yang cukup baik^[1], sedangkan bahan bakar dengan densitas 5,2 gU/cm³ siap untuk dilakukan uji iradiasi.

Material berbasis paduan UMo merupakan program penelitian pengembangan bahan bakar reaktor riset lebih lanjut yang dilakukan di PTBBN, selaras dengan penelitian

pengembangan bahan bakar reaktor riset di dunia. Percobaan pembuatan bahan bakar dispersi tipe pelat berukuran mini yang berisi bahan bakar UMo/Al, UMo/Al-Si, UMo-xM/Al, dan UMo-xM/Al-Si (menggunakan uranium deplesi) telah dilakukan dalam rangka mencari parameter proses fabrikasinya. Parameter proses fabrikasi optimal yang diperoleh selanjutnya akan diterapkan pada pembuatan bahan bakar dispersi tipe pelat dengan uranium pengkayaan 19,75%²³⁵U untuk uji iradiasi.

Bahan bakar dispersi berbasis UMo

Paduan uranium berbasis uranium–molybdenum (U-Mo) merupakan material penting di bidang teknik nuklir sebagai calon bahan bakar nuklir untuk reaktor riset. Paduan UMo dengan kandungan Mo antara 7 ~ 10% berat memiliki prospek yang sangat baik untuk digunakan sebagai bahan bakar nuklir dispersi dengan pengkayaan uranium rendah^[2]. Densitas paduan UMo memiliki densitas >16,0 g/cm³ (tergantung kadar Mo), dan mempunyai sifat tahan terhadap korosi, namun paduan ini bersifat ulet (*ductile*) sehingga mengalami kesulitan untuk pembuatan serbuk secara mekanik (*grinding mill/ball mill*). Densitas tersebut lebih tinggi dibandingkan dengan densitas 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. Dengan menggunakan bahan bakar dispersi berbasis U-Mo, densitas uranium di dalam inti (*meat*) pelat elemen bakar dapat ditingkatkan menjadi >8 gU/cm³. Densitas uranium tersebut sesuai dengan yang diperlukan reaktor riset terkait penggunaan uranium pengkayaan rendah.

Logam molybdenum (Mo) memiliki densitas 10,2g/cm³, tampang lintang serapan neutron rendah (2,65 barn), titik leleh= 2620°C, dan derajat kelarutan padat γ -U yang tinggi. Jika pendinginan lambat atau paduan mengandung < 7%Mo, kesetimbangan paduan U(Mo) di bawah temperatur 560 °C berupa campuran fasa α U dan γ (U₂Mo), sementara larutan padat γ -U/Mo terbentuk pada temperatur tinggi. Penambahan Mo antara 5% s.d. 20% atom Mo berfungsi untuk menstabilkan fasa γ -U dengan tetap mempertahankan densitas uraniumnya, serta meningkatkan titik leleh bahan bakar^[3]. Berdasarkan sifat sifat tersebut maka paduan uranium berbasis U-Mo dipromosikan untuk digunakan sebagai kandidat bahan bakar dispersi karena secara teoritis dapat difabrikasi dengan densitas uranium yang sangat tinggi dan bahan bakar paska iradiasinya mudah dilakukan olah ulang^[4].

Selama proses iradiasi bahan bakar U-7Mo/Al, terjadi interdifusi atau reaksi kimia antara partikel bahan bakar U-7Mo dengan matriks Al yang berada di sekitarnya membentuk lapisan/layer senyawa UAl_x(UAl₂, UAl₃, UAl₄) dan pori. Densitas UAl_x hasil reaksi lebih rendah dari pada kombinasi densitas reaktan sehingga dengan pertumbuhan

layer menyebabkan terjadinya *swelling meat* bahan bakar yang cukup signifikan^[4,5]. Pertumbuhan *layer* hasil interaksi menyebabkan konduktivitas termal lebih rendah dari pada matriks sehingga temperatur bahan bakar naik yang dapat merusak bahan bakar. Untuk mengatasi hal tersebut, maka dalam pengembangannya dilakukan modifikasi paduan UMo sehingga mampu menstabilkan lapisan hasil interaksi dan mereduksi *swelling*^[2,6]. Beberapa alternatif yang dapat dilakukan antara lain menambahkan unsur logam (Zr, Ti, Si, dll) ke dalam paduan UMo atau menggunakan bahan matriks yang berbeda seperti serbuk Al atau campuran Al dan Si^[8].

Paduan U-7Mo-xM

Pembuatan paduan berbasis UMo termasuk di dalamnya U-7Mo-xM dapat dilakukan dengan teknik peleburan menggunakan tungku busur listrik (*arc melt*) atau tungku induksi. Peleburan campuran logam uranium dan logam pemadu dilakukan menggunakan *arc melt* (tungku busur listrik) bermedia gas *inert* dan pada bagian dasar ruang lebur didinginkan menggunakan air dingin temperatur 15°C. Fungsi media gas *inert* dimaksudkan agar selama proses peleburan hanya terjadi reaksi antara uranium dan unsur pemadu dengan tanpa dipengaruhi oleh unsur-unsur yang lain. Proses peleburan, dimulai dengan mendekatkan elektrode pada campuran uranium dan pemadu (yang berada di ruang peleburan dan bermedia gas *inert*) sehingga membentuk loncatan api (nyala) sehingga terjadi pencairan logam uranium dan pemadu. Pada kondisi cair tersebut terjadi reaksi antara uranium dan pemadu membentuk fasa baru. Selama proses peleburan terjadi pencairan, tetapi tidak sampai pada bagian dasar wadah peleburan karena dapat merusak wadah peleburan dan menambah impuritas material yang dilebur. Setiap peleburan tidak semua benda kerja mencair, sehingga agar diperoleh paduan yang homogen, maka proses peleburan dilakukan berulang-ulang yaitu dengan cara membalik benda kerja dan dilebur kembali demikian seterusnya hingga 5 kali^[9]. Prinsip dari proses ini adalah pemanasan pada temperatur di atas titik lebur unsur logam sehingga semua unsur logam U, Mo dan M meleleh sehingga membentuk fasa baru dalam bentuk paduan. Proses peleburan menggunakan tungku busur listrik dilakukan berulang-ulang pada kondisi vakum/media gas *inert* sehingga diperoleh paduan yang homogen dan tidak terjadi reaksi dengan unsur-unsur di lingkungannya selain unsur pemadu.

Serbuk U-7Mo-xM

Paduan berbasis U-Mo baik biner maupun ternair bersifat ulet sehingga tidak dapat diubah menjadi serbuk secara langsung dengan cara mekanik dan harus dilakukan dengan

metode lain. Beberapa metode yang dapat digunakan diantaranya: *cryogenic mechanical crushing*, hidriding - dehidriding, dan proses atomisasi.

Proses pembuatan serbuk UMo 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 UMo 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. Dengan proses dehidriding maka fasa γ -U akan diperoleh kembali dengan proses termal, yaitu mengatur temperatur proses pada fasa γ ^[2]. Paduan UMo yang diperoleh dalam bentuk butiran kasar kemudian digerus menjadi serbuk halus dengan diameter ukuran partikel $\sim 90 \mu m$. Serbuk UMo yang telah memenuhi persyaratan tersebut dapat dilanjutkan untuk penelitian dalam bentuk pelat elemen bakar (PEB). Persyaratan serbuk U-7Mo-xTi mengacu spesifikasi serbuk bahan bakar U_3Si_2 untuk bahan bakar RSG-GAS^[10].

Inti Elemen Bakar dan Pelat Elemen Bakar U-7Mo-xM/Al

Inti elemen bakar U-7Mo-xM/Al dibuat dengan teknik pengepresan pada tekanan tinggi terhadap campuran serbuk bahan bakar U-7Mo-xM dan matriks Al, sedangkan pelat elemen bakar U-7Mo-xM/Al dibentuk dengan proses pengerolan.

Selama proses pengepresan IEB dan pengerolan panas PEB, partikel bahan bakar dan matriks bergerak dan tersusun kembali tanpa mengalami deformasi/rusak atau sebaliknya. Perpindahan partikel terbesar terjadi pada proses pengepresan dan perolan panas tahap pertama. Kerapuhan senyawa/serbuk bahan bakar mengakibatkan partikel mudah pecah pada proses pengerolan, sehingga fraksi halus di dalam *meat* akan lebih banyak dibandingkan dengan di dalam IEB. Fraksi halus di dalam *meat* akan bertambah dengan kenaikan fraksi volume bahan bakar. Kenaikan fraksi halus bahan bakar akan memperluas permukaan kontak partikel bahan bakar yang dapat memperlambat aliran matriks, dan akhirnya berdampak pada kenaikan porositasnya. Prosentase porositas yang terbentuk di dalam pelat elemen bakar ditentukan oleh parameter antara lain ukuran dan kekerasan partikel bahan bakar, kekuatan matriks, temperatur pengerolan, tebal akhir *meat* dan fraksi volume bahan bakar. Hal ini kemungkinan terdapat korelasi antara fraksi halus partikel bahan bakar ($\sim 44 \mu m$) dan porositas di dalam *meat*. Selain beberapa kemungkinan tersebut di atas penggunaan bahan bakar dengan partikel yang terlalu halus akan

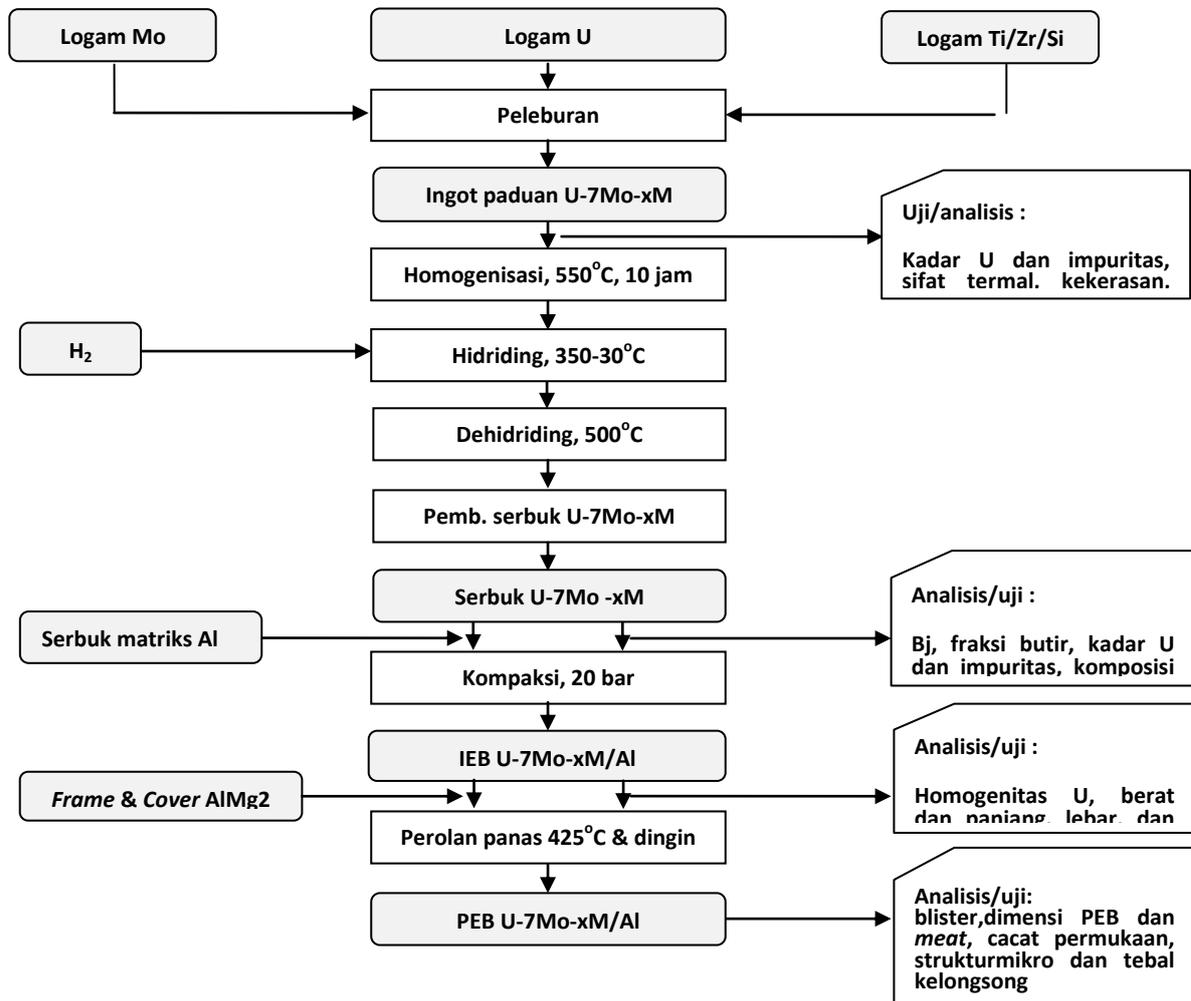
memungkinkan terbentuknya *whites spots* pada PEB. Ukuran partikel butir dan densitas uranium mempengaruhi jarak antar partikel bahan bakar. Jarak antar partikel bahan bakar = 0 apabila fraksi volum bahan bakar di dalam *meat* sebesar 74%^[11]. Pada kondisi tersebut partikel bahan bakar akan bersinggungan. Secara umum fraksi volum bahan bakar maksimum di dalam matriks Al yang masih dapat difabrikasi adalah berkisar antara 45 s/d 50%. Berdasar pengalaman beberapa fabrikator/lembaga penelitian menyebutkan bahwa untuk fabrikasi bahan bakar U_3O_8 jumlah partikel halus ($-44 \mu m$) harus $<25\%$, sedangkan fabrikasi bahan bakar U_3Si_2/Al partikel halus disarankan $<15\%$ [12]. Fraksi halus partikel bahan bakar U_3Si_2 dinaikkan dari 0 s/d 25% terjadi kenaikan porositas. Perubahan prosentase porositas akibat perubahan fraksi volume bahan bakar U_3Si_2 lebih rendah dibanding U_3Si , ini kemungkinan disebabkan oleh kerapuhannya.

Campuran serbuk U-7Mo-xM dan matriks Al dibentuk menjadi inti elemen bakar IEB U-7Mo-xM/Al dengan cara kompaksi pada tekanan tinggi. Perbandingan berat serbuk U-7Mo-xM dan matriks Al sangat tergantung pada densitas uranium yang diinginkan, dan berat masing-masing dihitung berdasar data analisis serbuk yang meliputi: densitas U-7Mo-xM dan Al, kadar U dalam UMo, dan ^{235}U nya. IEB hasil kompaksi ditimbang, diukur kadar ^{235}U nya dan ketebalannya. 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 dan dilanjutkan pengerolan dingin hingga ketebalan sesuai standar PEB. Evaluasi hasil PEB mengacu spesifikasi PEB U_3Si_2/Al RSG-GAS diantaranya : blister yang diijinkan $\leq 1,8 \text{ mm}^2$, cacat permukaan $\leq 80 \mu m$, dan tebal kelongsong minimum 0,25 mm.

TATA KERJA

Penelitian bahan bakar U-7Mo-xM(x=1%, 2%, 3% dan M = Ti/Zr/Si) tipe pelat menggunakan uranium deplesi dilakukan dengan pembuatan *meat* dalam ukuran mini (model). Penelitian dimulai dengan pembuatan paduan U-7Mo-xM dengan Teknik peleburan. Paduan U-7Mo-xM hasil proses peleburan yang bersifat ulet dirapuhkan dengan Teknik hidriding-dehidriding. Paduan yang sudah rapuh diubah menjadi serbuk dengan grinding mill dan diayak di dalam *glove box* bermedia gas argon. Selanjutnya dianalisis kadar U dan unsur logam pengotornya, fraksi ayak dan berat jenisnya, demikian juga serbuk Al yang digunakan sebagai matriks. Teknik pembuatan pelat elemen bakar (PEB) dari ketiga jenis bahan bakar U-7Mo-xM dilakukan dengan cara yang sama. Bahan bakar U-7Mo-xM dibuat dengan Teknik metalurgi serbuk, sedangkan PEB dibuat dengan Teknik pengerolan.

. Alur proses penelitian pembuatan PEB U-7Mo-Ti/Al secara garis besar ditunjukkan pada Gambar 1^[13].



Gambar 1. Diagram alir pembuatan PEB U-7Mo-xM/Al

HASIL DAN PEMBAHASAN

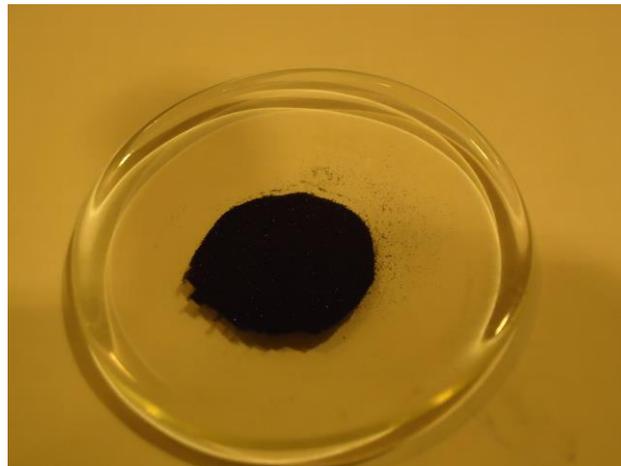
Paduan U-7Mo-xM

Paduan U-7Mo-xM dibuat dengan teknik peleburan menggunakan tungku busur listrik bermedia gas argon. Peleburan dilakukan menggunakan arus 150 A, dan setiap paduan dilebur dengan lima kali pengulangan. Ingot paduan hasil peleburan cukup homogen, ulet, dan secara visual tidak teramati adanya oksida uranium pada permukaannya. Sifat ulet tersebut menyebabkan ingot tidak bisa diubah langsung menjadi serbuk dengan cara mekanik sehingga digunakan metode lain yaitu dengan teknik hidriding dehidriding-grinding mill.

Serbuk U-7Mo-xM

Teknik hidriding pada penelitian ini adalah untuk mereaksikan paduan U-7Mo-xM dengan hidrogen pada temperatur kamar hingga 350°C sehingga terbentuk paduan U-7Mo-xM.H_y. Hidrogen masuk secara intertisi pada batas butir, sehingga paduan U-7Mo-xM.H_y menjadi rapuh dan mudah dibuat serbuk secara mekanik. Sebagai persyaratan bahan bakar nuklir, keberadaan hidrogen di dalam paduan bahan bakar maksimum 2000 ppm.

Paduan U-7Mo-xM hasil proses dehidriding bersifat rapuh dan sangat reaktif terhadap oksigen membentuk oksida uranium. Oleh karena itu pembuatan serbuk dengan menggunakan grinding mill dan proses pengayaan untuk memisahkan partikel butiran dengan ayakan standar ASTM yang dilakukan di dalam *glove box* bermedia gas argon. Serbuk U-7Mo-xM (contoh Gambar 2.) yang telah dikenai proses ayak selanjutnya dianalisis kadar U, impuritas, dan densitasnya. Analisis kadar U dan densitas serbuk U-7Mo-xM yang ditunjukkan pada Tabel 2. Hasil analisis kadar U dan berat jenis terlihat bahwa dengan kenaikan kadar unsur ketiga di dalam paduan, kadar U dan berat jenisnya menurun. Fraksi butiran serbuk dapat dipenuhi dengan pengaturan waktu proses grinding mill sehingga diperoleh komposisi -90 +38 μm = 75 -85% dan -38 μm = 15 – 25% sesuai spesifikasi bahan bakar RSG-GAS.



Gambar 2. Serbuk U-7Mo^[13]

Tabel 2. Data kadar U dan berat jenis serbuk^[14]

No	Serbuk	Kadar U, %	Berat jenis, g/cm ³
	U-7Mo		
	U-7Mo-1Zr	92,19	17,35
	U-7Mo-2Zr	91,09	17,03
	U-7Mo-3Zr	--	--
	U-7Mo-1Ti	91,845	17,18

U-7Mo-2Ti	90,741	16,71
U-7Mo-3Ti	89,082	16,27
U-7Mo-1Si	92,16	15,90
U-7Mo-2Si	91,39	15,87
U-7Mo-3Si	90,67	15,78

Pelat bingkai dan pelat tutup

Pelat bingkai dan pelat tutup (kelongsong) dibuat dengan pemesian menggunakan bahan paduan AlMg2. Pembuatan *frame* dan *cover* dibuat dengan pengerolan lembaran pelat AlMg2 dan pemesian. Pengerolan lembaran AlMg2 untuk *frame* dilakukan hingga ketebalan 3,15 mm, sedangkan untuk *cover* hingga ketebalan 2,7 mm. Selanjutnya lembaran pelat AlMg2 dengan ketebalan 3,15 mm dibuat *frame* dengan pemesian berukuran [180 x 140 x 3,15] mm dengan lobang dibagian tengahnya berukuran 25 x 15 x 3,15 mm), sedangkan pelat dengan ketebalan 2,7 mm dibuat *cover* berukuran [180 x 140 x 2,7] mm. *Frame* dan *cover* (contoh Gambar 11) digunakan sebagai kelongsong PEB U-7Mo-xTi/Al.



Gambar 3. Pelat bingkai dan pelat tutup[15]

Inti Elemen Bakar U-7Mo-xM/Al

Campuran serbuk U-7Mo-xM dan serbuk matriks dengan perbandingan berat sesuai dengan densitas uranium 7 gU/cm^3 , dihomogenisasi dan dibentuk menjadi IEB U-7Mo-xM/Al dengan pengepresan pada tekanan antara 10 s.d. 20 bar. Hasil pengepresan merupakan IEB U-7Mo-xM/Al (contoh Gambar 4) berbentuk empat persegi panjang dengan ukuran panjang dan lebar sesuai desain yaitu masing-masing 25 mm dan 15 mm, sedangkan ketebalan terdapat beberapa hasil pengukuran diluar persyaratan ($3,15^{\pm 0,05}$ mm) seperti ditunjukkan pada Tabel 3. Pengamatan secara visual menunjukkan bahwa IEB

U-7-xM/Al hasil pengepresan cukup baik, tidak terdapat cacat berupa retak dan terlihat cukup homogen. Hasil pengukuran pada Tabel 3. terlihat bahwa panjang dan lebar sesuai desain, sedangkan ketebalannya masih terdapat beberapa IEB yang diluar $3,15^{\pm 0,05}$ mm. Simpangan ketebalan diluar rentang yang ditetapkan kemungkinan disebabkan distribusi serbuk matriks yang kurang homogen. Hal penting yang perlu diperhatikan dalam praktek adalah apabila hasil uji kadar uranium di dalam IEB sudah memenuhi persyaratan, sedangkan ketebalannya tinggal menambah atau mengurangi matriks Al nya sehingga memenuhi ketebalan IEB.



Gambar 4. Contoh IEB U-7Mo-xM/Al

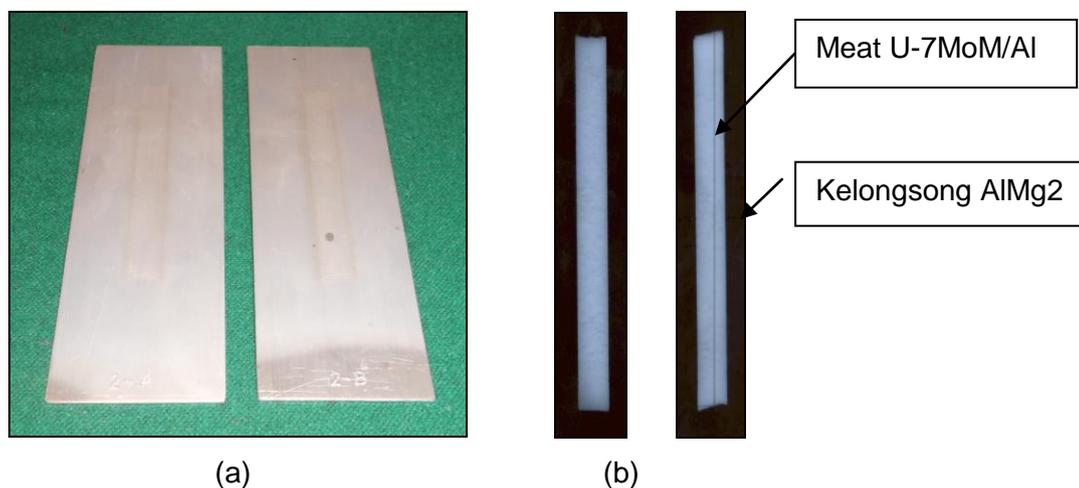
Tabel. 3. Hasil pengukuran dimensi IEB U-7Mo-xM/Al^[16].

Berat serbuk, g		Berat IEB, g	Dimensi IEB, mm	Tekanan, Bar
U-7Mo-1Ti	Al			
8,658	1,323	9,92	25 x15 x3,17	20
8,658	1,323	9,85	25 x15 x 3,17	20
U-7Mo-2Ti	Al			
8,763	1,304	9,96	25 x15 x 3,07	20
8,763	1,304	9,88	25 x15 x 3,07	20
U-7Mo-3Ti	Al			
8,927	1,277	10,10	25 x15 x 3,57	20
8,927	0,852	9,71	25 x15 x 2,87	20
8,927	1,062	9,91	25 x15 x 3,05	20
U-7Mo-1Zr	Al			
5,6622	1,2801	6,1	30 x 10 x 3,36	10
U-7Mo-2Zr	Al			
6,2246	1,2801	7,52	30 x 10 x 3,42	10
		7,53	30 x 10 x 3,41	10
U-7Mo-1Si	Al			
6,9503	1,0432	8,0511	30 x 10 x 3,15	10

6,9501	1,0429	8,0323	30 x 10 x 3,15	10
U-7Mo-2Si	Al			
7,0085	1,0312	8,1210	30 x 10 x 3,15	10
7,0087	1,0310	7,9860	30 x 10 x 3,05	10
U-7Mo-3Si	Al			
7,0640	1,0148	8,0885	30 x 10 x 3,23	10
7,0645	1,0147	8,1066	30 x 10 x 3,24	10

Pelat Elemen Bakar mini

Pelat bingkai, pelat tutup dan IEB U-7Mo-xM/Al dirakit menjadi komposit, kemudian ditipiskan secara bertahap dengan pengerolan panas dan dingin hingga ketebalan sekitar 1,4 mm. Selanjutnya pelat hasil pengerolan dilakukan pelurusan dan pemotongan sisi labar dan sisi panjangnya hingga diperoleh PEB U-7Mo-xM/Al mini seperti ditunjukkan pada Gambar 5.a. Pengamatan secara visual teramati bahwa PEB U-7Mo-xM/Al cukup lurus, pada permukaannya tidak terdapat cacat dalam bentuk lobang/retakan. Data radiografi terhadap PEB U-7Mo-xM/Al yang ditunjukkan pada Gambar 5.b terlihat bahwa distribusi uranium cukup homogen, tidak teramati adanya *white spots* disekitas/diluar *meat* dan ujung *meat* cukup bagus. Bila dibandingkan panjang IEB U-7Mo-xM/Al dengan panjang setelah pengerolan (*meat*), maka terjadi pemanjangan sekitar 6 x.



Gambar 5. (a) PEB U-7Mo-xM/Al

(b) Radiografi PEB U-7Mo-xM/Al[15]

Desain Bahan Bakar U-7Mo/Al Untuk Uji Iradiasi:

Penelitian pembuatan bahan bakar dispersi tipe pelat berbasis UMo dengan densitas uranium 7 gU/cm^3 menggunakan uranium deplesi dalam ukuran mini telah

dilakukan dan dikarakterisasi dengan jenis uji sesuai yang diterapkan dalam bahan bakar dispersi tipe pelat. Empat jenis paduan U-7Mo, U-7Mo-xM telah dibuat. Parameter proses dan uji yang diperoleh pada percobaan tersebut digunakan sebagai acuan untuk pembuatan sampel pelat elemen bakar ukuran mini dengan uranium pengkayaan 19,75% ²³⁵U untuk uji iradiasi di RSG-GAS.

Berdasarkan data desain, proses dan pengujian pembuatan bahan bakar tersebut maka selanjutnya digunakan sebagai acuan untuk pembuatan sampel uji iradiasi. Sebagai langkah awal uji iradiasi akan dilakukan terhadap pelat elemen bakar U-7Mo/Al dengan densitas uranium 7 gU/cm³ dalam bentuk mini dengan menggunakan uranium pengkayaan 19,75% ²³⁵U. Inti elemen bakar U-7Mo/Al dengan ukuran panjang x lebar x tebal (25 x 15 x 3,15^{±0,05}) mm. Inti elemen bakar U-7Mo/Al bersama pelat bingkai dan dua pelat tutup yang terbuat dari paduan AlMg2 dirakit membentuk komposit dan dibentuk menjadi pelat elemen bakar

U-7Mo/Al dengan pengerolan. Penentuan komposisi berat serbuk U-7Mo dan matriks Al dalam pembuatan pelat elemen bakar U-7Mo/Al dengan densitas 7 gU/cm³ dilakukan dengan perhitungan berdasarkan data ukuran dan volume IEB U-7Mo/Al, pengkayaan isotop ²³⁵U, kadar U di dalam U-7Mo, berat jenis serbuk U-7Mo dan matriks Al, serta asumsi pori di dalam IEB U-7Mo/Al. Data pengkayaan uranium, kadar U di dalam serbuk U-7Mo, berat jenis U-7Mo dan matriks Al ditunjukkan pada Tabel 1, sedangkan hasil perhitungan densitas uranium 5 s.d. 9 gU/cm³ ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 1. Data serbuk U-7Mo dan serbuk Al^[17]

Pengujian	Ketetapan/hasil uji
Kadar ²³⁵ U dalam logam U	±19,75 %
Kadar Uranium dalam serbuk U-7Mo	± 93,00 %
Berat jenis U-7Mo	16,336 g/cm ³
Fraksi partikel serbuk U-7Mo	- 150 µm + 44 µm = 75 - 85% - 44 µm = 15 - 25%
Berat jenis Al	2,7 g/cm ³
Fraksi partikel serbuk U-7Mo	- 150 µm - 44 µm (minimum 80%)

Tabel 2. Perbandingan Serbuk U-7Mo dan matriks Al dalam IEB U-7Mo/Al

	Densitas uranium, gU/cm ³				
	5	6	7	8	9
Berat U didalam IEB	5,680	6,816	7,952	9,088	10,224
Berat ²³⁵ U	1,122	1,346	1,571	1,795	2,019
Brt U-7Mo, g	6,107	7,329	8,551	9,772	10,993
Volume U-7Mo, cm ³	0,374	0,449	0,523	0,598	0,673
Prosen vol U-7Mo, %	32,922	39,523	46,039	52,641	59,243
Asumsi pori, 10%, cm ³	0,114	0,114	0,114	0,114	0,114
Vol Al, cm ³	0,648	0,573	0,499	0,424	0,349
Berat Al, g	1,750	1,547	1,347	1,145	0,942
Brt U-7Mo + Al, g	7,857	8,876	9,898	10,917	11,166

PEB U-7Mo/Al yang telah lolos uji dirakit ke dalam bentuk EBU U-7Mo/Al untuk uji iradiasi di RSG-GAS. PEB U-7Mo/Al di desain dengan dimensi panjang x lebar x tebal = $630^{\pm 0,2} \times 70,75^{\pm 0,15} \times 1,3^{\pm 0,07}$ mm yang berisi *meat* U-7Mo/Al atau U-6Zr/Al dengan dimensi panjang x lebar x tebal = $\pm 15 \times \pm 150 \times \pm 0,6$ mm yang dimuatkan pada posisi bagian atas PEB (pada sisi dekat/SD).

Sarana untuk uji iradiasi PEB U-7Mo/Al densitas uranium 7,0 gU/cm³ menggunakan *stringer* yang terdiri dari 21 alur seperti ditunjukkan pada Gambar 3.1. Tiga buah PEB U-7Mo/Al dirakit ke dalam *stringer* dengan cara disisipkan pada alur 2, 5 dan 8, sedangkan untuk PEB U-6Zr/Al dirakit ke dalam alur 14, 17 dan 20 seperti pada Gambar 6 a,b. Sementara itu, 15 alur lainnya dipasang PEB *dummy* dan diikat dengan pelat sisi menggunakan rol gencet.



Gambar 6 (a) Sarana uji iradiasi (stringer).
(b) Pelat Elemen Bakar U-7Mo/Al densitas 7 gU/cm³[17]

KESIMPULAN

Percobaan pembuatan paduan U-7Mo-xM, serbuk U-7Mo-xM, IEB U-7Mo-xM/Al telah diperoleh kondisi proses yang optimum dengan kualitas produk sesuai spesifikasi, sedangkan proses pembuatan PEB U-7Mo-xM/Al perlu diteliti lebih lanjut. Hal ini disebabkan data uji yang merupakan persyaratan PEB telah memenuhi persyaratan, kecuali ketebalan kelongsongnya masih terdapat beberapa titik pengukuran dengan ketebalan < 0,25 mm (persyaratan tebal kelongsong minimum 0,25 mm).

Berdasarkan data uji dan kondisi proses pembuatan PEB U-7Mo-xM/Al tersebut serta didukung perhitungan fisika reaktor, maka desain PEB U-7Mo/Al densitas uranium 7,0 gU/cm³ dengan uranium pengkayaan 19,75%²³⁵U untuk uji iradiasi telah dapat dilakukan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Atas terlaksananya penelitian hingga dituangkannya ke dalam makalah ini ucapan terima kasih disampaikan kepada seluruh pegawai PTBBN yang telah berkenan berpartisipasi.

DAFTAR PUSTAKA

1. Yusuf Nampira, Supardjo, Sri Ismarwanti, " Uji tidak merusak Bahan bakar U₃Si₂/Al Tingkat Muat Uranium 4,8 gU/cm³ Pasca Iradiasi Fraksi Bakar 20% dan 40%", bunga Rampai, Hasil Penelitian Pusat Teknologi bahan Bakar nuklir, 2013.
2. C.R. Clark, B.R. Muntifering and J.F. Jue, "Production and Characterization of Atomized U-Mo Powder By Rotating Electrode Process," The International Meeting on RERTR, Prague, Czech Republic, 2007
3. M. Cornen., M. Rodier, X. Iltis, S. Dubois, P. Lemoine, "About the Effects of Si and/or Ti Additions On the UMo/Al Interactions", RRFM, Hamburg, Germany, 2008.
4. S.H. Lee, J.M.Park, and C.K. Kim, "Thermophysical Properties of U-Mo/Al Alloy Dispersion Fuel Meats", International Journal of Themophysics, Vol 28, No.5., 2007.
5. Jong Man Park, Ho Jin Ryu, Jae Soon Park, Seok Jin Oh, Chang Kyu Kim, Yeon Soo Kim, Gerard L. Hofman, "Phase Stability of UMoTi Alloys and Interdiffusion Behaviors of UMoTi/AlSi", The International Meeting on RERTR, Prague, Czech Republic, 2007
6. Tom Wiencek, Totju Totev, "Development of Technology of High density LEU Dispersion Fuel Fabrication", International Meeting on RERTR, Czech Republic, September 23-27, 2007.

7. C.R. Clark et. al, "Update On Fuel Fabrication Development and Testing at Argonne national Laboratory, RERTR, 2004.
8. J. Allenou, O. Tougait, M. Pasturel, X. Iltis, F. Charollais, M.C. Anselmet, P. Lemoine, Interdiffusion behaviors in doped molybdenum uranium and aluminum or aluminum silicon dispersion fuels: Effects of the microstruktüre, *Jurnal of Nuclear Materials* 416 (2011) 205-210
9. Supardjo, Agoeng. K. dan Wisnu Ari Adi, "Pembentukan Single Phase Paduan U7Mo.xTi dengan Teknik Peleburan Menggunakan Tungku Busur Listrik,". *Jurnal Ilmiah Daur , Bahan Bakar Nuklir, URANIA*, Vol. 16 No 4, Oktober 2010.
10. Spesifikasi bahan bakar U₃Si₂/Al Reaktor Serba Guna G.A Siwabessy (RSG-GAS)
11. Samoilov, A.G.et.al,. "Dispersion Fuel Nuclear Reactor Elements," Atomizdat, Moskva, 1965.
12. R.F Domagala., T.C. Wiencek., H.R. Thresh and D. Stahl., The Status of uranium Silicon alloy fuel development for the RERTR Program, RERTR, November 1980.
13. Agoeng Kadarjono, Supardjo, "Karakteristik Proses Hidriding-Dehidriding Pada Paduan U-7Mo", *Prosiding Seminar Nasional Perkembangan Riset Dan Teknologi di Bidang Industri ke 19*, ISBN: 978-979-95620-9-8, Kantor Pusat Fakultas Teknik UGM, Yogyakarta, 4 Juni 2013.
14. Supardjo, Pengembangan Bahan Bakar Dispersi U-7Mo-xTi/Al Tipe Pelat Untuk Bahan Bakar Reaktor Riset. Disajikan pada Presentasi Ilmiah Jabatan Peneliti Utama Bidang Bahan Bakar Reaktor Riset, PTBBN-BATAN, 24 Oktober 2016
15. Supardjo, LAPORAN AKHIR Insentif Riset SINas 2013 dengan judul, "Pembuatan dan Karakterisasi Pelat Elemen Bakar Dispersi U-7Mo-Ti/Al dan U-7Mo-Ti/Al-Si Sebagai Kandidat Bahan Bakar Nuklir Reaktor Riset Tipe *Material Testing Reactor (MTR)*,". 06 Nopember 2013
16. Supardjo, Agoeng Kadarjono, Aslina Br Ginting , "Pembuatan Pelat Elemen Bakar Mini UMo-Al Dengan Densitas Uranium 6 dan 7 gU/cm³, " *Jurnal TEKNOLOGI BAHAN NUKLIR*, Vol 7 No 2, Juni 2011.
17. Laporan Analisis Keselamatan, Pengembangan Bahan bakar U₃Si₂/Al Densitas tinggi, Pusat teknologi Bahan Bakar Nuklir, No. Ident: PR40J19001, Rev 03, Agustus 2008.