

PERCOBAAN PEMBUATAN PELAT ELEMEN BAKAR U-7Mo-xSi/Al DALAM UKURAN MINI

Supardjo, Agoeng Kadarjono, Isfandi, Yatno Dwi Agus Susanto,
Setia Permana, Guswardani.

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir – BATAN
Kawasan PUSPIPTEK Serpong Gd.20 Tangerang Selatan, Banten 15314
e-mail: suparjo@batan.go.id

(Naskah diterima: 24-09-2019, Naskah direvisi: 14-10-2019, Naskah disetujui: 28-10-2019)

ABSTRAK

PERCOBAAN PEMBUATAN PELAT ELEMEN BAKAR U-7Mo-xSi/Al DALAM UKURAN MINI.

Penelitian pembuatan pelat elemen bakar mini U-7Mo-xSi/Al dalam rangka pengembangan bahan bakar dispersi densitas uranium tinggi. Tujuan penelitian adalah untuk mendapatkan parameter proses yang tepat sehingga diperoleh produk pelat elemen bakar mini U-7Mo-xSi/Al yang memenuhi spesifikasi. Alur proses dimulai dari pembuatan paduan U-7Mo-xSi ($x = 1\%$, 2% , dan 3%) menggunakan uranium deplesi dan dilanjutkan pembuatan serbuk U-7Mo-xSi, inti elemen bakar U-7Mo-xSi/Al, dan pelat elemen bakar U-7Mo-xSi/Al. Untuk mengetahui kualitas maka selama proses berlangsung diikuti analisis/pengujian yang meliputi bahan baku, dan produk dari setiap akhir tahapan proses dengan jenis uji sesuai yang diterapkan pada proses pembuatan bahan bakar tipe pelat. Produk ingot paduan U-7Mo-xSi, serbuk U-7Mo-xSi, dan IEB U-7Mo-xSi/Al cukup baik dan memenuhi spesifikasi sehingga hal ini menunjukkan bahwa parameter proses yang diterapkan sudah sesuai, namun untuk pelat elemen bakar yang dihasilkan belum memenuhi persyaratan terutama ketebalan kelongsongnya masih terdapat beberapa titik pengukuran yang ketebalannya $< 0,25$ mm. Untuk mendapatkan ketebalan kelongsong sebagaimana yang dipersyaratkan tersebut perlu dilakukan pengulangan dengan mencoba parameter pengerolan yang lain atau mengganti material kelongsong yang memiliki kekerasan yang lebih tinggi.

Kata kunci: Bahan bakar paduan U-7Mo-xSi, densitas uranium tinggi, reaktor riset.

ABSTRACT

EXPERIMENT ON THE FABRICATION OF U-7Mo-xSi/Al MINI FUEL PLATES. *The purpose of this study is to obtain the optimized process parameters in the fabrication of a U-7Mo-xSi/Al mini plate complying with the specifications. The process flow started with synthesizing U-7Mo-xSi alloys ($x = 1\%$, 2% , and 3%) using depleted uranium and continued to preparing U-7Mo-xSi powder, U-7Mo-xSi/Al fuel core, and U-7Mo-xSi/Al fuel element plates. The quality of the product was determined by analyses/tests including tests of raw materials and products from each end of the process by the appropriate type of test which is commonly applied to the manufacturing process of plate type fuel. The quality of U-7Mo-xSi alloy ingots, U-7Mo-xSi powder, and U-7Mo-xSi/Al fuel core was satisfactorily good and in compliance with the specifications, indicating that the applied process parameters were appropriate. The obtained fuel element plates, however, have not satisfied the requirements especially the thickness of the cladding, where there are still several measurement points whose thickness is <0.25 mm. To obtain cladding thickness according to the required specifications, it is necessary to experiment with other rolling parameters or replacing the cladding material with material of higher hardness.*

Keywords: *The U-7Mo-xSi fuel alloy, high uranium density, research reactor.*

PENDAHULUAN

Konversi penggunaan uranium di dalam bahan bakar reaktor riset dari pengkayaan tinggi (>90% ^{235}U) ke pengkayaan rendah (<20% ^{235}U) merupakan kesepakatan internasional yang dituangkan dalam program *Reduced Enrichment Research and Test Reactor* (RERTR) dalam rangka menghindari penyalahgunaan untuk persenjataan nuklir[1-3]. Dengan menggunakan uranium pengkayaan rendah, maka jumlah ^{235}U di dalam bahan bakar akan berkurang dan tinggal 1/5 nya, sehingga akan berdampak penurunan kinerja operasi reaktor[4]. Upaya untuk mempertahankan jumlah ^{235}U di dalam bahan bakar tetap sama dengan sewaktu menggunakan uranium pengkayaan tinggi, maka perlu dipilih material bahan bakar baru yang memiliki densitas tinggi. Material yang memiliki prospek untuk digunakan sebagai bahan bakar adalah paduan uranium berbasis U-Mo dengan kadar Mo antara 7 s.d 10 % berat baik dibuat dalam bentuk biner/terner[5].

Paduan berbasis UMo memiliki densitas >16 g/cm³ (tergantung kadar Mo) yang lebih tinggi dibandingkan dengan densitas UAl_x (6,7g/cm³), U₃O₈ (8,4 g/cm³), dan U₃Si₂ (12,2 g/cm³) yang telah dipakai sebagai bahan bakar reaktor riset. Data densitas tersebut menunjukkan bahwa secara teoritis dengan menggunakan UMo sebagai bahan bakar densitas uranium dapat ditingkatkan lebih tinggi sehingga jumlah ^{235}U dapat lebih tinggi pula[6,7]. Pemilihan paduan berbasis UMo sebagai bahan bakar dengan uranium pengkayaan rendah dengan pertimbangan bahwa selain densitasnya tinggi, juga unsur Mo cocok untuk menstabilkan fasa uranium. Keuntungan lainnya adalah dimensional paduan UMo sangat stabil, ketahanan korosinya tinggi dan tahan pada temperatur tinggi[8]. Bahan bakar UMo untuk reaktor riset dapat dibuat dalam bentuk batang atau pelat disesuaikan dengan reaktor penggunaannya. Bahan bakar bentuk pelat biasanya berisi bahan bakar dispersi

atau monolitik[3], kemudian dibungkus dengan kelongsong paduan aluminium. Di dalam bahan bakar dispersi tipe pelat, serbuk bahan bakar UMo didispersikan secara merata ke dalam matriks Al.

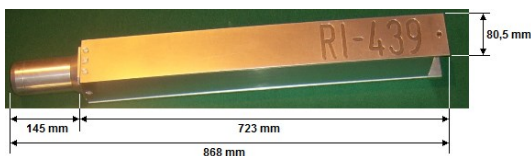
Paduan UMo merupakan kandidat bahan bakar densitas uranium tinggi untuk reaktor riset berdaya tinggi karena unjuk kerjanya sangat baik. Pada saat pelat elemen bakar dispersi U-Mo/Al di iradiasi terjadi reaksi antara partikel UMo dan Al membentuk lapisan UAl_x di antara partikel UMo dan matriks Al. Lapisan UAl_x bersifat amorf, konduktivitas panasnya rendah densitasnya lebih rendah dari pada UMo sehingga berpotensi terjadinya *swelling*[9,10]. Untuk menghilangkan atau menurunkan pembentukan senyawa amorf tersebut perlu dilakukan dengan cara menambahkan unsur logam Si ke dalam matriks atau bentuk paduan UMoSi. Unsur Si afinitas kimia lebih tinggi dengan uranium dari pada Al, banyaknya layer Si yang terdapat antara UMo dapat sebagai penghalang difusi dan memperlambat interaksi antara UMo dan Al di dalam bahan bakar[10, 11].

Selaras dengan penelitian pengembangan bahan bakar densitas uranium tinggi dengan uranium pengkayaan rendah yang dilakukan di dunia, PTBBN sebagai lembaga litbang bahan bakar nuklir saat ini juga melakukan penelitian bahan bakar dispersi berbasis UMo, yang merupakan pengembangan bahan bakar U₃Si₂/Al. Hasil penelitian bahan bakar U₃Si₂/Al densitas uranium 2,96 gU/cm³ telah diproduksi oleh PT. INUKI (persero) dan digunakan sebagai bahan bakar RSG-GAS, sedangkan bahan bakar U₃Si₂/Al densitas 4,8 gU/cm³ telah dilakukan uji iradisi hingga *burn-up* 60% dan hasil uji secara tidak merusak menunjukkan *kinerja/stabilitas* yang cukup baik[12].

Penelitian bahan bakar paduan berbasis UMo di PTBBN dibuat kedalam bentuk pelat elemen bakar mini dengan menggunakan bahan baku uranium depleksi.

Paduan UMo, UMoZr dan UMoTi telah dibuat kedalam bentuk Pelat Elemen Bakar UMo/Al, UMoZr/Al dan UMoTi/Al hingga densitas uranium $7,0 \text{ gU/cm}^3$ dan pada tulisan ini dibahas hasil penelitian pembuatan PEB UMoSi/Al. Alur penelitian dimulai dari pembuatan paduan U-7Mo-xSi, dan dilanjutkan pembuatan serbuk U-7Mo-xSi, inti elemen bakar/IEB U-7Mo-xSi/Al dan pelat elemen bakar/PEB U-7Mo-xSi/Al. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan parameter proses yang optimum dari seluruh rangkaian proses tersebut hingga diperoleh produk yang memenuhi spesifikasi bahan bakar dispersi tipe pelat. Parameter proses optimum yang diperoleh selanjutnya akan digunakan sebagai acuan untuk pembuatan PEB U-7Mo-xSi/Al berukuran mini dengan densitas uranium $7,0 \text{ gU/cm}^3$ menggunakan uranium pengkayaan 19,75% ^{235}U untuk uji iradiasi di RSG GAS.

Sasaran akhir dari penelitian ini adalah pembuatan elemen bakar U-7Mo-xSi/Al tipe pelat dengan densitas uranium $7,0 \text{ gU/cm}^3$ sesuai desain elemen bakar $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ yang digunakan sebagai bahan bakar RSG-GAS seperti ditunjukkan pada Gambar 1[13].



Gambar 1. Elemen bakar $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$.

METODOLOGI

Penelitian bahan bakar U-7Mo-xSi ($x=1\%$, 2% , 3%) tipe pelat menggunakan uranium deplesi dilakukan dengan pembuatan Inti Elemen Bakar dalam ukuran mini ($30 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 3,15 \text{ mm}$). Penelitian dimulai dengan pembuatan paduan U-7Mo-xSi dengan teknik peleburan terhadap campuran logam U, Mo dan Si dengan komposisi berat masing-masing sesuai dengan pembuatan paduan U-7Mo-xSi. Paduan U-7Mo-xSi hasil proses peleburan

bersifat ulet sehingga tidak bisa diubah dirapuhkan dirapuhkan langsung menjadi serbuk dengan cara mekanik. Pada penelitian ini pembuatan serbuk dari paduan U-7Mo-xSi hasil peleburan dilakukan 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. Hasil analisis dan volume IEB digunakan sebagai data masukan dalam perhitungan penentuan komposisi berat serbuk U-7Mo-xSi dan serbuk matriks Al yang harus di timbang sesuai dengan densitas $7,0 \text{ gU/cm}^3$. Serbuk U-7Mo-xSi dan matriks Al dihomogenisasi, kemudian dikompaksi pada tekanan 10 bar hingga membentuk IEB U-7Mo-xSi/Al. Selanjutnya IEB U-7Mo-xSi/Al, frame dan cover pelat AlMg2 dirakit dan dilas beberapa titik pada keempat sisi sambungannya membentuk paket rol. Paket rol diubah menjadi Pelat Elemen Bakar (PEB) dengan teknik pengerolan panas dan pengerolan dingin. Pengerolan panas pada temperatur $425 \text{ }^\circ\text{C}$ dilakukan 4 tahap untuk mereduksi ketebalan paket rol dari 8,55 mm menjadi sekitar 1,65 mm, dan dilanjutkan pengerolan dingin beberapa tahap hingga diperoleh ketebalan sekitar 1,40 mm.

Alur proses penelitian pembuatan PEB U-7Mo-xSi/Al secara garis besar ditunjukkan pada Gambar 2[7].

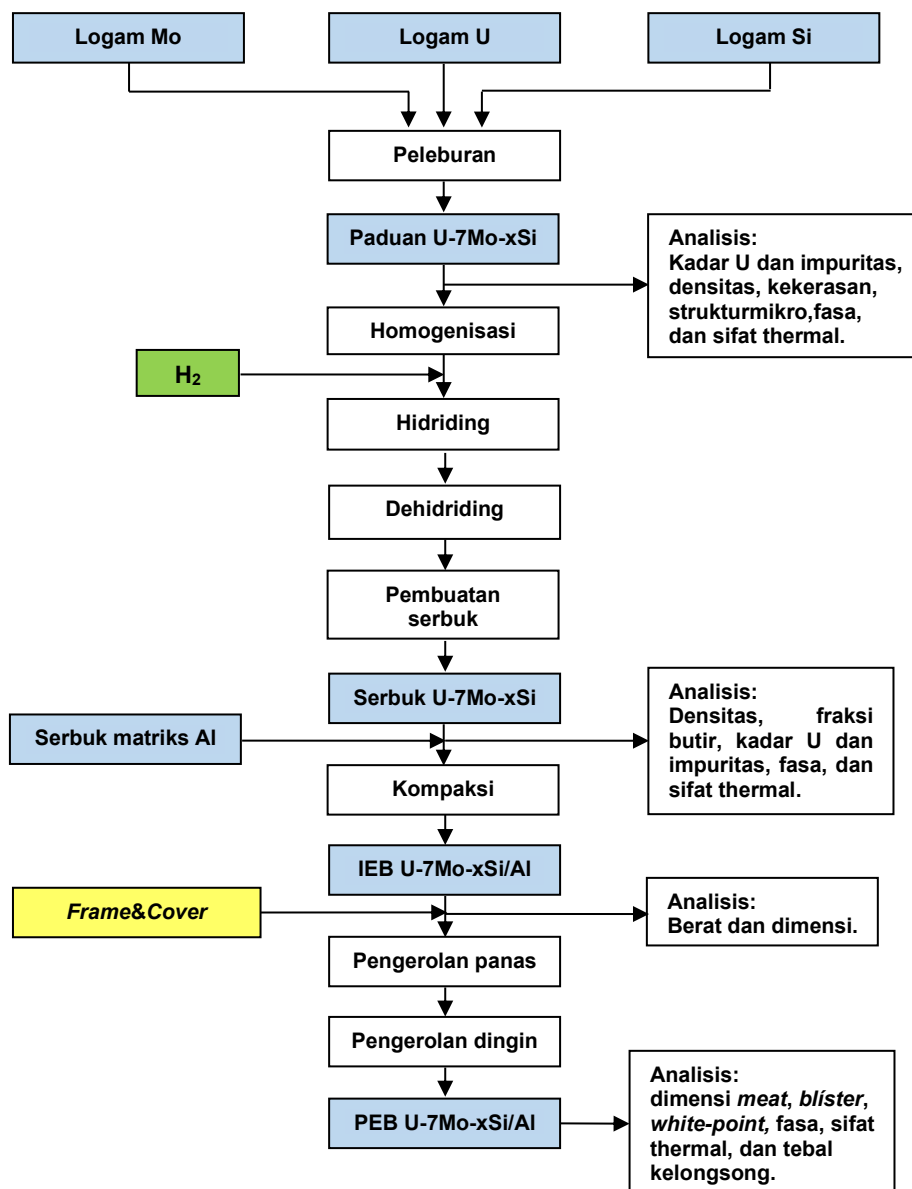
HASIL DAN PEMBAHASAN

Bahan baku yang digunakan untuk pembuatan bahan bakar U-7Mo-xSi/Al adalah logam uranium deplesi, molybdenum dan silikon sebagai pembuatan paduan dan serbuk Al sebagai matriks. Bahan baku pembuatan paduan U-7Mo-xSi ditunjukkan pada Gambar 3. Logam uranium sangat reaktif dengan oksigen membentuk uranium oksida, sehingga sebelum digunakan sebagai bahan baku untuk proses pembuatan bahan bakar terlebih dahulu

dilakukan pencucian (proses pikling). Proses pikling logam menggunakan asam nitrat sambil dipanaskan pada temperatur 70 °C beberapa detik sudah cukup menghilangkan oksida yang menempel pada permukaannya. Apabila tidak dilakukan pencucian dan masih terdapat unsur pengotor, maka pada proses peleburan akan terbentuk senyawa baru yang merupakan pengotor.

Sebelum dilakukan proses lebih lanjut, bahan-bahan tersebut dianalisis untuk mengetahui kemurnian dan unsur-unsur logam pengotor yang terdapat di dalam masing-masing logam tersebut. Kemurnian

khususnya logam uranium akan digunakan untuk perhitungan penentuan komposisi pada pembuatan paduan, sedangkan unsur pengotor pada masing-masing logam perlu dilakukan analisis karena kandungannya harus berada dibawah spesifikasi. Analisis kadar U di dalam uranium deplesi dilakukan dengan titrimetri menggunakan alat titroprocessor, sedangkan unsur logam pengotor dianalisis menggunakan alat *Atomic Absorption Spectrograph* (AAS). Hasil analisis diperoleh seperti ditunjukkan pada Tabel 1.



Gambar 2. Diagram alir pembuatan PEB U-7Mo-xSi/Al.



Gambar 3. Logam U, Mo dan Si sebagai bahan baku pembuatan paduan U-7Mo-xSi

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

Unsur pengotor	Kadar Dalam Sampel (ppm)				Keterangan
	logam U	pelet Mo	logam Si	serbuk Al	
Cd	ttd	1,68	-	ttd	ttd=<0,2
Fe	8,25	35,07	1	288,00	
Co	ttd	11,30	-	ttd	ttd=<0,5
Mn	ttd	3,14	-	220,00	ttd=<0,2
Mg	2,49	0,27	1	30,00	
Cu	ttd	7,25	-	18,40	ttd=<0,2
Cr	ttd	ttd	-	ttd	ttd=<0,5
Ni	ttd	60,94	-	ttd	ttd=<0,5
Si	ttd	ttd	-	700,00	ttd=<15,0
Kadar U, %			99,94		

ttd: tidak terdeteksi

Kadar uranium deplesi hasil analisis sebesar 99,94% sudah memenuhi syarat yang ditetapkan yaitu sebesar (99,90 %), selanjutnya dipakai sebagai data masukan dalam perhitungan komposisi berat logam U, Mo, dan Si yang harus ditimbang dalam pembuatan paduan U-7Mo-xSi (x= 1%, 2%,

dan 3%). Sebagai dasar penimbangan adalah berat uranium (93%) dan Mo (7%), sedangkan untuk menentukan prosen berat Si dihitung dari berat U-7Mo nya. Hasil perhitungan komposisi berat masing-masing logam pada pembuatan paduan U-7Mo-xSi ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Komposisi berat bahan baku untuk porsi lebur paduan U-7Mo-xSi

Logam U murni hasil pikling, g	Logam Mo, g	Logam Si, g	Sebelum peleburan, g	Setelah peleburan, g	Komposisi paduan
20,482	1,5336	0,2362	22,2641	22,2552	U-7Mo-1Si
19,9791	1,5208	0,2338	21,7457	21,7246	U-7Mo-1Si
19,9545	1,5039	0,4684	21,9388	21,9325	U-7Mo-2Si
20,3401	1,5336	0,4779	22,3638	22,3724	U-7Mo-2Si
20,1183	1,5142	0,6691	22,3137	22,2917	U-7Mo-3Si
21,0348	1,5832	0,6991	23,3297	23,3345	U-7Mo-3Si

Pembuatan paduan U-7Mo-xSi dibuat dengan teknik peleburan menggunakan tungku busur listrik dalam media gas argon. Penggunaan media gas argon dimaksudkan agar selama proses peleburan tidak terjadi reaksi dengan unsur-

unsur lainnya membentuk senyawa baru yang berakibat terjadi penurunan kemurnian paduan U-7Mo-xSi. Proses peleburan paduan menggunakan arus listrik 150 A dengan 5 kali pengulangan peleburan diperoleh ingot paduan U-7Mo-xSi yang

masif, ulet, dan pada permukaannya tidak teramati adanya pori dan oksida. Ingot paduan U-7Mo-xSi hasil peleburan

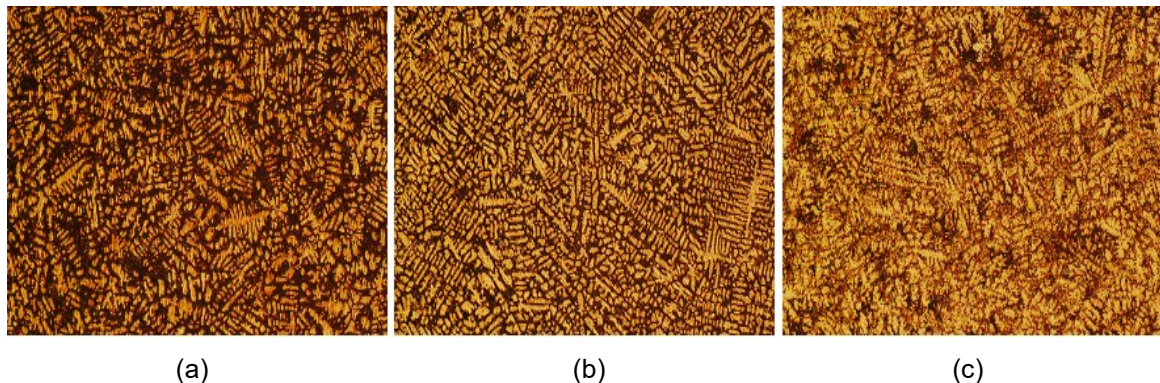
berdiameter 15 mm dengan ketebalan sekitar 5 mm dan potongannya ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Ingot paduan U-7Mo-xSi hasil proses peleburan dan potongannya

Struktur mikro ingot paduan U-7Mo-xSi terlihat berstruktur dendritik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Semakin tinggi kandungan Si di dalam paduan, semakin besar kemungkinan terbentuknya struktur dendritik. Hal ini dikarenakan dibutuhkan waktu dan temperatur yang cukup untuk

unsur Si agar dapat melarut sempurna kedalam logam uranium. Untuk mendapatkan struktur yang homogen dapat dilakukan dengan proses homogenisasi dengan cara pemanasan pada temperatur 500 °C selama 10 jam.



Gambar 5. Struktur mikro paduan U-7Mo-xSi hasil proses pemaduan/peleburan

- a. Paduan U-7Mo-1Si
- b. Paduan U-7Mo-2Si
- c. Paduan U-7Mo-3Si

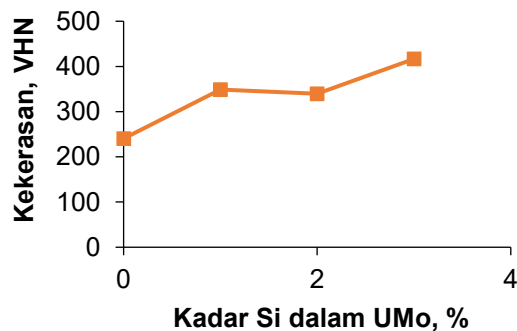
Ingot paduan U-7Mo-xSi hasil proses peleburan dilakukan analisis/pengujian kadar U, berat jenis dan kekerasannya. Analisis kadar uranium dilakukan dengan metode titrimetri menggunakan alat titroprocessor, berat jenis menggunakan Ultrapyc 1200e dan kekerasan menggunakan vickers Hardness. Hasil analisis kadar U dan berat jenis ingot

paduan U-7Mo-xSi ditunjukkan pada Tabel 3. Logam Si sebagai pemadu mempunyai berat jenis 2,4 g/cm³, jauh lebih rendah dibandingkan dengan U dan Mo yang masing-masing sebesar 18,485 g/cm³, 10,2 g/cm³. Dengan kenaikan kadar Si maka berat total paduan meningkat sehingga kadar U menurun.

Tabel 3. Kadar uranium dan densitas paduan U-7Mo-xSi hasil proses peleburan

Komposisi paduan U-7Mo-xSi	Berat total, g	Kadar U, %	Densitas, g/cm ³
U-7Mo	-	93,257	16,336
U-7Mo-1Si	43,9798	92,07	15,90
U-7Mo-2Si	44,3049	91,14	15,87
U-7Mo-3Si	45,6262	90,21	15,78

Kekerasan paduan U-7Mo-Si cenderung meningkat seiring dengan meningkatnya kadar Si seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6. Logam molibdenum akan larut padat pada logam uranium. Logam Mo dan Si yang larut dalam logam uranium menimbulkan regangan kisi pada logam uranium. Interaksi antara regangan kisi, *impurity atom*, dan dislokasi menyebabkan pergerakan dislokasi menjadi terhambat. Semakin banyak logam pengotor dalam paduan, maka semakin banyak regangan kisi yang terjadi dan pergerakan dislokasi menjadi semakin terhambat. Terhambatnya pergerakan dislokasi menyebabkan kekerasan material menjadi semakin meningkat.



Gambar 6. Kekerasan paduan U-7Mo dengan variasi kadar Si.

Dalam penggunaannya sebagai bahan bakar dispersi, paduan U-7Mo-xSi harus diubah menjadi serbuk. Paduan U-7Mo-Si hasil peleburan adalah ulet sehingga tidak dapat diubah menjadi serbuk secara langsung dengan cara mekanik seperti halnya material yang rapuh. Pembuatan serbuk paduan U-7Mo-xSi dilakukan dengan teknik hidriding, dehidriding dan dilanjutkan proses grinding-mill. Selama proses hidriding terjadi reaksi antara paduan U-7Mo-xSi dan

hidrogen membentuk U-7Mo-xSiH_x yang bersifat rapuh, dan dilanjutkan proses dehidriding sehingga terjadi disosiasi U-7Mo-xSiH_x menjadi U-7Mo-xSi yang tetap rapuh (Gambar 7) dan gas hidrogen. Paduan U-7Mo-xSi yang rapuh dan sudah terbebas dari hidrogen dapat dibuat serbuk dengan cara mekanik (ditumbuk). Perlu diketahui bahwa paduan U-7Mo-xSi adalah sangat reaktif dengan oksigen sehingga proses pembuatan serbuk harus dilakukan di dalam ruang tertutup dalam kondisi vakum atau media gas inert.



Gambar 7. Paduan U-7Mo-xSi hasil proses hidriding-dehidriding

Pada penelitian ini pembuatan serbuk U-7Mo-xSi dilakukan di dalam glove box dan dalam media gas argon. Hal penting yang harus dilakukan pengujian terhadap serbuk adalah kadar U, berat jenis, unsur pengotor serbuk dan fraksi partikel butir. Ukuran partikel serbuk dalam standar internasional adalah -150 μm dengan komposisi -150+40 μm = 75–85 %berat, dan -40 μm = 15-25 %berat, sedangkan RSG-GAS menggunakan -90 μm dengan komposisi -90+40 μm = 75–85 %berat, dan -40 μm = 15–25 %berat. Data hasil pengujian serbuk U-7Mo-xSi ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil analisis kadar U, densitas, dan fraksi serbuk U-7Mo-xSi hasil proses hidriding-dehidriding-grinding mill.

Serbuk	Berat Serbuk, g	Kadar U, %	Densitas, g/cm ³	fraksi, g (%)		
				>90 μ m	+38-90 μ m	<38 μ m
U-7Mo-1Si	39,6823	92,16	15,90	14,5187 (36,6)	17,0745 (43)	8,0891 (20,1)
U-7Mo-2Si	39,1503	91,39	15,87	6,8126 (17,4)	23,3555 (59,7)	8,9822 (22,9)
U-7Mo-3Si	34,1638	90,67	15,78	2,5877 (7,6)	16,1335 (47,2)	15,4426 (45,2)

Tabel 4 menunjukkan bahwa makin tinggi kadar Si, kadar uranium dan densitasnya menurun. Data kadar uranium dan berat jenis serbuk U-7Mo-xSi digunakan sebagai data masukan pembuatan inti elemen bakar U-7Mo-xSi/Al. Dengan menggunakan data kadar U dan berat jenis (Tabel 4) dan desain

dimensi IEB U-7Mo-xSi = 30 mm x 10 mm x 3,15 mm, maka komposisi berat serbuk U-7Mo-xSi dan serbuk matriks Al yang harus dicampur untuk membuat bahan bakar dengan densitas uranium 7 gU/cm³ dapat dihitung. Hasil perhitungan ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil perhitungan komposisi material untuk pembuatan IEB U-7Mo-xSi /Al

IEB U-7Mo-xSi/Al	Kode IEB U-7Mo-xSi/Al	Berat serbuk U-7Mo-xSi, g	Berat serbuk Al, g	Berat serbuk U-7Mo-xSi +Al, g	Fraksi pori, %
U-7Mo-1Si /Al	1	6,9503	1,0432	8,0511	10
U-7Mo-1Si /Al	2	6,9501	1,0429	8,0323	10
U-7Mo-2Si /Al	3	7,0085	1,0312	8,1210	10
U-7Mo-2Si /Al	4	7,0087	1,0310	7,9860	10
U-7Mo-3Si /Al	5	7,0640	1,0148	8,0885	10
U-7Mo-3Si /Al	6	7,0645	1,0147	8,1066	10

Masing-masing komposisi serbuk U-7Mo-xSi dan Al dicampur hingga homogen, kemudian dipress dengan tekanan 10 bar hingga membentuk IEB U-7Mo-xSi/Al seperti ditunjukkan pada contoh Gambar 8.

Secara visual seluruh IEB tidak terdapat retak/pecah. Data uji pengukuran dimensi (panjang, lebar, tebal) dan berat ditunjukkan pada Tabel 6.

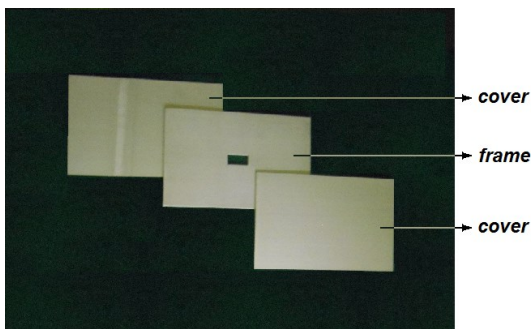
Tabel 6. Hasil analisis berat dan dimensi IEB U-7Mo-xSi /Al hasil proses kompaksi

Komposisi IEB U-7Mo-xSi/Al	Panjang, mm	Lebar, mm	Tebal, mm	Berat, g
U-7Mo-1Si /Al	30	10	3,15	8,0511
U-7Mo-1Si /Al	30	10	3,15	8,0323
U-7Mo-2Si /Al	30	10	3,15	8,1210
U-7Mo-2Si /Al	30	10	3,05	7,9860
U-7Mo-3Si /Al	30	10	3,23	8,0885
U-7Mo-3Si /Al	30	10	3,24	8,1066



Gambar 8. Contoh IEB U-7Mo-1Si /Al hasil pengepresan.

Kelongsong pelat elemen bakar U-7Mo-1Si /Al digunakan pelat AlMg2 yang dibuat dalam bentuk *frame* dan *cover*. *Frame* dan *cover* dibuat dengan pengerolan lembaran pelat AlMg2 dan pemesian. Lembaran pelat AlMg2 berukuran 1000 mm x 180 mm x 6 mm dirol hingga terjadi penurunan ketebalan dari 6 mm menjadi 3,15 mm untuk *frame* dan 2,7 mm untuk *cover*. Pelat AlMg2 hasil rol dengan ketebalan 3,15 mm dibuat *frame* dengan pemesian berukuran 180 mm x 140 mm x 3,15 mm dengan lubang di bagian tengahnya berukuran 30 mm x 10 mm x 3,15 mm, sedangkan pelat dengan ketebalan 2,7 mm dibuat *cover* berukuran 180 mm x 140 mm x 2,7 mm. Setiap pelat elemen bakar terdiri dari dua *cover* dan satu *frame* seperti ditunjukkan pada Gambar 9.



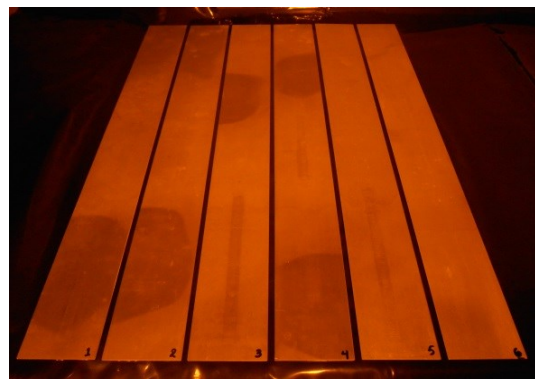
Gambar 9. *Frame* dan *cover*

Inti Elemen Bakar U-7Mo-Si/Al yang berdimensi sekitar (30 x 10 x 3,15 \pm 0,05) mm, dimasukkan kedalam lubang *frame*, kemudian pada keempat sisi sambungannya dilas beberapa titik hingga membentuk paket rol. Paket rol setebal sekitar 8,55 cm ditipiskan dengan pengerolan panas pada temperatur 425 °C beberapa tahap hingga dicapai ketebalan sekitar 3,65 mm,

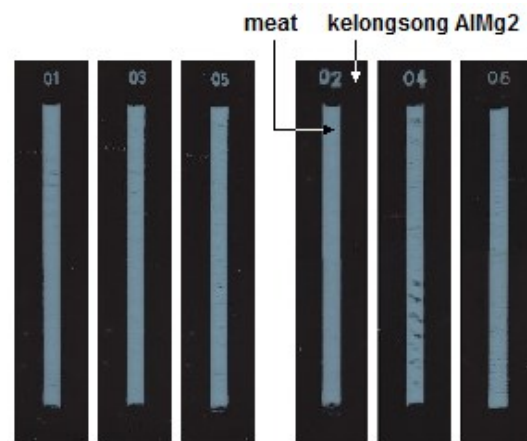
selanjutnya dirol dingin hingga diperoleh ketebalan 1,4 mm. Selanjutnya dilakukan pengujian meliputi: dimensi luar PEB, dimensi *meat* dengan teknik radiografi, dan tebal kelongsong.

Pelat Elemen Bakar mini U-7Mo-xSi/Al

Pelat elemen bakar mini U-7Mo-xSi/Al ditunjukkan pada Gambar 10 dan data uji radiografi ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 10. PEB U-7Mo-xSi/Al



Gambar 11. Hasil Radiografi PEB U-7Mo-xSi/Al

Dari Gambar 10 terlihat bahwa posisi *meat* berada ditengah pelat elemen bakar dan bercak hitam pada permukaan merupakan pelumas yang menempel pada proses pengerolan. Bercak hitam tersebut dapat dihilangkan dengan cara *degreasing* dan pikling. Data radiografi pada Gambar 11, tidak teramati adanya *white spots* yaitu partikel U-7Mo-xSi yang keluar dari zona

meat, namun terlihat bahwa pada daerah *meat* terdapat noda hitam yang dimungkinkan merupakan aglomerasi serbuk matriks Al. Hal ini kemungkinan disebabkan partikel serbuk Al terlalu halus atau masih

terdapat kandungan uap air sehingga waktu proses pencampuran antara serbuk U-7Mo-xSi dan matriks Al kurang homogen. Bentuk ujung *meat* relatif rata dan data pengukuran dimensi ditunjukkan pada Tabel 7.

Tabel 7. Analisis dimensi *meat*, *blister* dan *white point* dalam PEB menggunakan radiografi sinar-x

PEB	Kode	Dimensi <i>meat</i>		Tebal PEB, mm
		Panjang, mm	Lebar, mm	
U-7Mo-1Si	01	18,5	12,0	1,41
U-7Mo-1Si	02	18,3	11,3	1,39
U-7Mo-2Si	03	18,4	11,2	1,39
U-7Mo-2Si	04	18,2	11,0	1,38
U-7Mo-3Si	05	18,9	11,6	1,41
U-7Mo-3Si	06	18,1	11,4	1,44

Pengukuran tebal kelongsong dilakukan dengan memotong PEB U-7Mo-xSi/Al pada ketiga bagian yaitu tengah dan kedua ujungnya. Pemotongan bagian tengah tegak lurus arah pengerolan sedangkan kedua ujungnya dipotong sesuai arah pengerolan. Masing-masing potongan disiapkan kedalam bentuk sampel metalografi dan pengukuran ketebalan kelongsong menggunakan mikroskop optik yang dilengkapi fasilitas ukur. Potongan sampel uji PEB U-7Mo-xSi/Al yang ditunjukkan pada Gambar 12 terlihat bahwa pada kedua ujung PEB terdapat *dog bone* yang merupakan aglomerasi bahan bakar U-7Mo-xSi. Terbentuknya pada proses pengerolan yang disebabkan oleh densitas uranium bahan

bakar yang tinggi (serbuk bahan bakar banyak sedangkan serbuk matriks sedikit). Data pengukuran tebal kelongsong menunjukkan bahwa tebal rerata >0,307 mm, sedangkan ketebalan minimum yang diijinkan 0,25 mm. Walaupun ketebalan reratanya masih memenuhi spesifikasi, namun terdapat beberapa titik data pengukuran yang mempunyai ketebalan <0,25 mm, sehingga PEB U-7Mo-xSi/Al dinyatakan belum memenuhi persyaratan. Upaya yang akan dilakukan adalah mencari parameter proses pengerolan atau menggunakan material kelongsong paduan aluminium yang mempunyai kekerasan lebih tinggi seperti paduan aluminium seri 6061.



Gambar 12. Potongan PEB U-7Mo-1Si/Al

SIMPULAN

Produk ingot paduan U-7Mo-xSi, serbuk U-7Mo-xSi, dan IEB U-7Mo-xSi/Al cukup baik dan memenuhi spesifikasi. Sementara itu, pelat elemen bakar yang dihasilkan belum memenuhi persyaratan terutama ketebalan kelongsongnya masih

terdapat beberapa titik pengukuran yang ketebalannya <0,25 mm. Penyelesaian masalah ketebalan kelongsong tersebut perlu dilakukan eksperimen dengan menggunakan parameter pengerolan yang lain atau mengganti material kelongsong yang memiliki kekerasan yang lebih tinggi.

UCAPAN TERIMA KASIH

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

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Van Den Berghe Sven, Leenaers Ann, Koonen Edgar and Sannen Leo, From High to Low Enriched Uranium Fuel in Research Reactors, *Advances in Science and Technology Vol. 73 (2010) pp 78-90*
- [2] S. V. D. Berghe, *et.al.*, "Swelling of U(Mo)–Al(Si) dispersion fuel under irradiation: Non-destructive analysis of the LEONIDAS E-FUTURE plates," *Journal of Nuclear Materials*, vol. 430, pp. 246-258, 2012.
- [3] S. Hu, D. Burkes, C. A. Lavender, V. Joshi, "Effect of grain morphology on gas bubble swelling in UMo Fuels Effect: A 3D microstructure dependent Booth model," *Journal of Nuclear Materials*, vol. 480, pp. 246-258, 2016.
- [4] Supardjo, A. Kadarjono, A. B. Ginting, "Pembuatan pelat elemen bakar mini UMo-Al dengan densitas uranium 6 dan 7 gU/cm³," *Jurnal Teknologi Bahan Nuklir*, vol. 7, no 2, 2011.
- [5] H. Y. Chiang, *et.al.*, "Evidence of amorphous interdiffusion layer in heavy ion irradiated U-8wt%Mo/Al interfaces," *Journal of Nuclear Materials*, vol. 440, pp. 117-123, 2013.
- [6] H. Palancher, *et.al.*, Uranium–molybdenum nuclear fuel plates behaviour under heavy ion irradiation: An X-ray diffraction analysis", *Journal of Nuclear Materials*, vol. 385, pp. 449-455, 2009.
- [7] Supardjo, "Pengembangan Bahan Bakar Dispersi U-7Mo-xTi/Al Tipe Pelat Untuk Bahan Bakar Reaktor Riset," Presentasi Ilmiah Jabatan Peneliti Utama Bidang Bahan Bakar Reaktor Riset 24 Oktober 2016, PTBBN-BATAN.
- [8] T. R. G. Kutty, *et.al.*, "Thermophysical properties of U-2Mo intermetallic," *Journal of Nuclear Materials*, vol. 420, pp. 193-197, 2012.
- [9] J. Allenou, *et.al.*, "Interdiffusion behaviors in doped molybdenum uranium and aluminum or aluminum silicon dispersion fuels: Effect of the microstructure," *Journal of Nuclear Materials*, vol. 416, pp. 205-210, 2011.
- [10] Y.J. Jeong, *et.al.*, Heavy ion irradiation of Nitride and Silicon Coated U-Mo-Ti/Al Fuel, RRFM European Research Reactor Conference, 2013.
- [11] H. J. Ryu, J. S. Park, J. M. Park, and C. K. Kim, "The effect of Si-rich layer coating on UMo vs. Al interdiffusion," *Advance in Science and Technology*, vol. 73, pp. 78-90, 2010.
- [12] Y. Nampira, Supardjo, S. Ismarwanti, "Uji tidak merusak bahan bakar U₃Si₂/Al tingkat muat uranium 4,8 gU/cm³ pasca iradiasi fraksi bakar 20% dan 40%," *Hasil Penelitian Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir*, 2013.
- [13] Spesifikasi bahan bakar U₃Si₂/Al Reaktor Serba Guna G.A Siwabessy (RSG-GAS).