

PEMADUAN DAN FABRIKASI SERBUK UMoTi, UMoZr DAN UMoSi

Supardjo, Agoeng K, Maman K. A, Boybul, Isfandi, Hendro W, Suhatno,
Yatno D. A.S Susanto, Susworo, Setia P, Dadang, Guswardani, Purwanta,
Suhardyo, Iis Haryati, Torowati, Slamet P, Yanlinastuti
Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir - BATAN

ABSTRAK

Pemaduan dan fabrikasi serbuk U-7Mo-xTi, U-7Mo-xZr dan U-7Mo-xSi ($x=1\%$, 2% , 3%) telah dilakukan dalam rangka pengembangan bahan bakar dispersi tipe pelat untuk reaktor riset. Pembuatan paduan dengan teknik peleburan menggunakan tungku busur listrik bermedia gas argon. Ingot paduan yang dihasilkan dari proses peleburan berdiameter sekitar 20 mm dan tebal 5 mm diubah menjadi serbuk dengan teknik *hydride -dehydride - grinding mill*. Permukaan paduan tidak teramati adanya lapisan oksida, masif tidak berpori, dan bersifat ulet. Penambahan unsur Ti, Zr, atau Si ke dalam paduan U-7Mo menyebabkan perubahan sifat paduan. Makin tinggi kadar Ti, Zr, atau Si di dalam paduan, maka kekerasan meningkat, densitas dan kadar U menurun. Paduan U-7Mo-xTi, U-7Mo-xZr dan U-7Mo-xSi hasil proses hidriding-dehidriding bersifat piroporik dan rapuh sehingga mudah dibuat serbuk dengan cara mekanik. Bentuk serbuk yang dihasilkan tidak beraturan dengan ukuran butir $<150\ \mu\text{m}$. Keberadaan unsur Ti/Zr/Si di dalam paduan U-7Mo pada pemanasan antara temperatur ruang hingga 450°C tidak terjadi perubahan kapasitas panas yang signifikan, sedangkan perubahan fasa terjadi di atas temperatur 500°C , sehingga dapat dinyatakan bahwa paduan U-7Mo-xTi, U-7Mo-xZr dan U-7Mo-xSi mempunyai kestabilan panas yang baik hingga temperatur 500°C .

Kata kunci: paduan uranium, paduan U-7Mo-xTi, U-7Mo-xZr dan U-7Mo-xSi, tungku busur listrik, hidriding-dehidriding.

PENDAHULUAN

Uranium merupakan salah satu bahan utama yang digunakan sebagai bahan bakar reaktor nuklir, baik reaktor riset maupun reaktor daya. Jenis bahan bakar dapat dalam bentuk uranium oksida, MOX, atau paduan uranium, dan masing-masing jenis tersebut sangat tergantung dari reaktor penggunaannya^[1].

Reaktor riset G.A. Siwabessy yang ada di Serpong merupakan reaktor jenis *Materials Testing Reactor (MTR)* yang berfungsi untuk produksi isotop dan pengujian material. Berdasarkan disain awal, reaktor dioperasikan menggunakan bahan bakar dispersi $\text{U}_3\text{O}_8/\text{Al}$ dengan pengayaan uranium $19,75\% \text{ }^{235}\text{U}$. Bahan bakar dispersi $\text{U}_3\text{O}_8/\text{Al}$ difabrikasi di BATAN menggunakan fasilitas produksi Instalasi Produksi Elemen Bakar Reaktor Riset (IPEBRR) yang berada di Kawasan Puspiptek Serpong. Selain produksi bahan bakar $\text{U}_3\text{O}_8/\text{Al}$, dilakukan pula penelitian dan pengembangan bahan bakar $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ dengan fasilitas produksi yang ada di IPEBRR. Penelitian bahan bakar $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ berhasil dengan baik dan telah ditingkatkan keskala produksi. Dengan keberhasilan penelitian dan pengembangan bahan bakar $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$, maka, sejak tahun 2001, semua bahan bakar diteras reaktor RSG-GAS telah berhasil digantikan dengan bahan bakar $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ dengan

pengayaan dan densitas uranium $2,96 \text{ gU/cm}^3$ sama dengan bahan bakar $\text{U}_3\text{O}_8/\text{Al}^{(2)}$. Bahan bakar dispersi $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ dibuat dengan cara memadukan uranium dengan unsur silikon menjadi senyawa U_3Si_2 dan didispersikan ke dalam matriks aluminium. Bahan bakar $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ ini memiliki stabilitas yang tinggi selama digunakan sebagai bahan bakar di dalam reaktor, namun densitas uranium yang dapat dicapai maksimum hanya sekitar $4,8 \text{ gU/cm}^3$, sehingga umur ekonomi bahan bakar di dalam reaktor sangat pendek⁽³⁾. Selain itu olah ulang bahan bakar $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ sangat sulit, sehingga menjadi masalah dalam penyimpanannya. Mengingat bahan bakar paduan U_3Si_2 ini banyak digunakan di reaktor riset di dunia, maka para peneliti berlomba untuk mencari paduan uranium dengan logam lain yang memiliki densitas uranium tinggi, sehingga umur ekonomi bahan bakar di dalam reaktor menjadi lebih panjang. Penelitian dan pengembangan bahan bakar reaktor riset berbasis U-Mo dengan pengayaan uranium $< 20\%^{235}\text{U}$ merupakan program internasional dalam memenuhi densitas uranium antara $8-9 \text{ gU/cm}^3$ ^[4]. Meskipun bahan bakar jenis paduan U-Mo ini bisa mencapai densitas uranium $> 8 \text{ gU/cm}^3$, namun selama diuji di reaktor, bahan bakar ini mengalami *swelling* lebih tinggi dibandingkan dengan bahan bakar $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$. Oleh karena itu perlu dilakukan penelitian lanjut dengan memadu U-Mo dengan logam lain agar diperoleh paduan baru yang memiliki karakteristik lebih baik dibandingkan dengan U_3Si_2 maupun UMo.

Penambahan unsur logam Si, Ti, atau Zr ke dalam paduan U-Mo dapat meningkatkan stabilitas hasil interaksi lapisan dalam bahan bakar dispersi. Perlakuan panas pada $\gamma\text{U-Mo-xSi}$, $\gamma\text{U-7Mo-xTi}$, $\gamma\text{U-7Mo-xZr}$ adalah fasa γU yang metastabil, dan pada konsentrasi Mo dan Si, Ti dan Zr yang tinggi membentuk endapan $(\text{U,Mo})_2\text{Si}$, $(\text{U,Mo})_2\text{Ti}$, $(\text{U,Mo})_2\text{Zr}$ di batas butir. Butiran dan densitas endapan menjadi lebih keras seiring kenaikan kadar Si, Ti dan Zr^(4,5). Stabilitas fasa paduan γUMoSi , γUMoZr sama seperti fenomena yang terjadi pada paduan $\gamma\text{UMoTi}^{(6)}$.

Pada penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan proses, yaitu pembuatan paduan U-7Mo-xSi, U-7Mo-xZr, U-7Mo-xTi ($x = 1, 2, \text{ dan } 3\%$) dengan teknik peleburan menggunakan tungku busur listrik bermedia gas argon. Proses aniling paduan pada tekanan vakum ($1 \times 10^{-5} \text{ mbar}$) dan temperatur $500 \text{ }^\circ\text{C}$ selama 10 jam, dan dilanjutkan proses hidriding menggunakan gas hidrogen pada temperatur $< 500^\circ\text{C}$ terhadap paduan U-7Mo-xSi, U-7Mo-xZr, U-7Mo-xTi untuk mengubah paduan *masif* dan keras menjadi senyawa U-7Mo-xSiH_x , U-7Mo-xZrH_x , U-7Mo-xTiH_x yang bersifat *brittle*. Proses *chrushing* untuk menghancurkan paduan U-7Mo-xSiH_x , U-7Mo-xZrH_x , U-7Mo-xTiH_x menjadi serbuk kasar, dan dilanjutkan proses dehidriding pada temperatur $> 500^\circ\text{C}$ untuk mendesorpsi hidrogen yang terkandung di dalam serbuk^(7,8). Serbuk kasar paduan U-7Mo-xSi, U-7Mo-xZr, U-7Mo-xTi yang sudah terbebas dari hidrogen dikenai proses *ball milling* untuk

mengubah ukuran partikel serbuk kasar menjadi serbuk halus sesuai dengan spesifikasi serbuk yang diharapkan. Serbuk U-7Mo-xSi, U-7Mo-xZr, U-7Mo-xTi yang telah memenuhi spesifikasi, dapat digunakan untuk penelitian lebih lanjut pada pembuatan inti elemen bakar (IEB) dan pelat elemen bakar (PEB) U-7Mo-xSi/Al, U-7Mo-xZr/Al, U-7Mo-xTi/Al.

Bahan bakar paduan uranium berbasis U-Mo (U-7Mo-xSi, U-7Mo-xZr, U-7Mo-xTi) merupakan material baru untuk pengembangan bahan bakar dispersi jenis U_3Si_2/Al yang telah dipakai sebagai bahan bakar oleh sebagian reaktor riset di dunia hingga saat ini. Permasalahan yang ada adalah bahan bakar berbasis U-Mo bersifat ulet dan selama proses iradiasi bahan bakar UMo/Al terjadi *swelling* lebih tinggi dibanding bahan bakar U_3Si_2/Al pada *burn-up* yang sama. Sifat ulet paduan uranium berbasis U-Mo menyebabkan paduan U-Mo hasil peleburan tidak bisa langsung dibuat serbuk secara mekanik (*grindingmill/ballmill*). Untuk menyelesaikan permasalahan ini maka pembuatan serbuk dilakukan melalui metode *hydride-dehydride-grinding mill*. Paduan berbasis U-Mo dihidrogenasi hingga membentuk U-Mo-H_x yang bersifat rapuh, kemudian dibuat serbuk secara mekanik. Serbuk U-Mo-H_x di *dehydride* dengan pemanasan pada temperatur > 500°C untuk melepaskan hidrogen yang terikat.

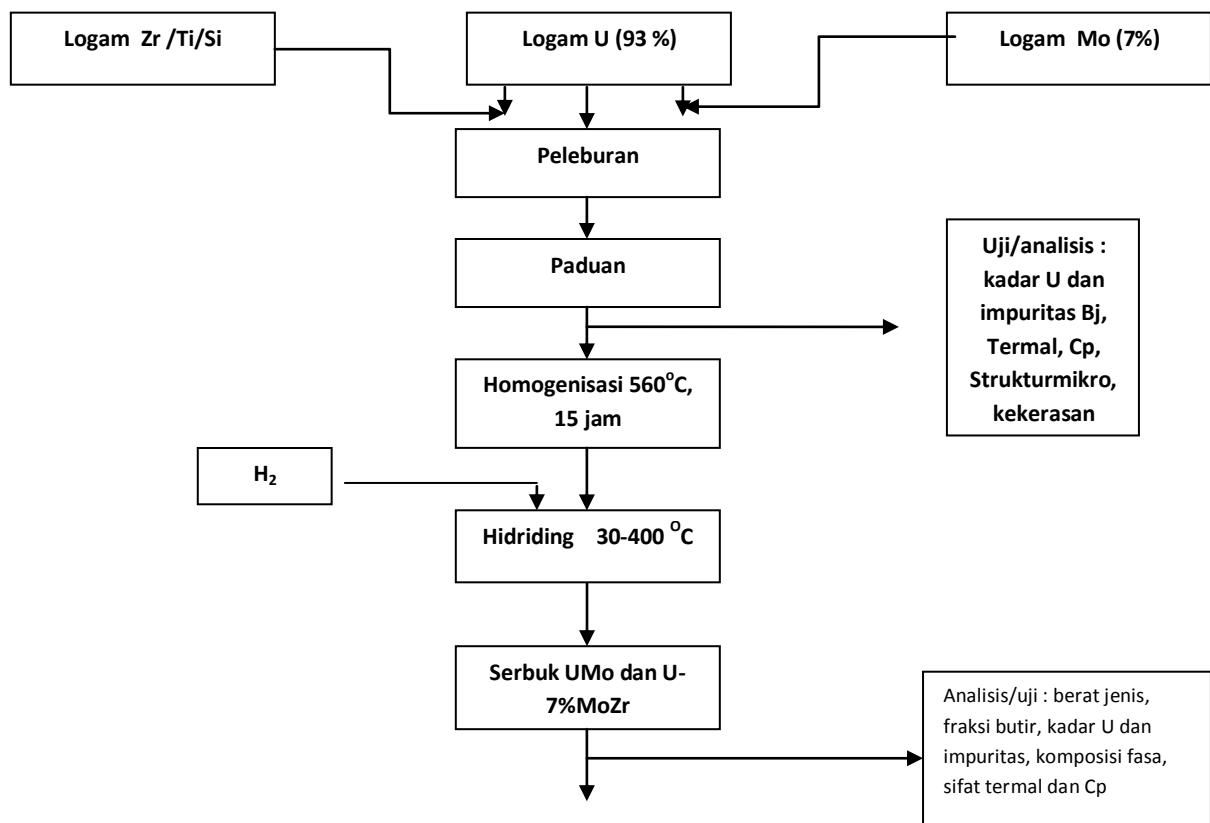
Swelling bahan bakar dispersi UMo/Al yang terjadi saat proses iradiasi di dalam reaktor, kemungkinan disebabkan oleh interaksi *layer* pada interfase antara U-Mo dengan matriks Al. Untuk mengurangi pembentukan *layer* tersebut, pada penelitian ini akan dilakukan penambahan unsur logam Zr, Si, atau Ti ke dalam paduan U-Mo sebagai penstabil. Penambahan unsur Zr, Si, atau Ti ke dalam paduan UMo, pada perlakuan panas akan membentuk endapan (U,Mo)₂Zr, (U,Mo)₂Si, (U,Mo)₂Ti di batas butir. Partikel butir dan densitas endapan menjadi lebih keras seiring kenaikan kadar Zr, Si, atau Ti, sehingga *swellingnya* menurun.

Teknik observasi: Bahan baku logam U, Mo, dan Zr/Si/Ti masing-masing dianalisis untuk menentukan kadar dan impuritasnya, selanjutnya paduan dengan komposisi U-7Mo.xZr, U-7Mo.xSi, U-7Mo.xTi dibuat dengan teknik peleburan menggunakan tungku busur listrik. Paduan hasil peleburan dihomogenisasi dengan pemanasan pada temperatur 500°C selama 10 jam sebagian dikenai uji berat jenis, mikrostruktur, sifat termal dan kapasitas panasnya, sedangkan yang lainnya dikenai proses *hydride - dehydride*. Serbuk U-7Mo.xZr, U-7Mo.xSi, dan U-7Mo.xTi hasil proses hidriding-dehidriding yang telah bebas hidrogen diuji dan dianalisis kadar U dan impuritasnya, berat jenis, fraksi butir partikel serbuk, sifat termal, kapasitas panas dan komposisi fasanya. Serbuk U-7Mo.xZr, U-7Mo.xSi, U-7Mo.xTi yang telah memenuhi syarat bahan bakar dicampur dengan matriks Al dengan perbandingan tertentu sesuai dengan densitas

uranium yang diinginkan kemudian dibentuk menjadi inti elemen bakar (IEB) dengan pengepresan dan pelet elemen bakar (PEB) dengan proses pengerolan.

METODOLOGI

Penelitian pembuatan paduan dan serbuk U-7Mo.xZr, U-7Mo.xSi, U-7Mo.xTi dilakukan dengan alur proses seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Lingkup penelitian meliputi penyiapan bahan baku logam (U depleksi, Mo, Si, Ti dan Zr), pembuatan paduan, serbuk dan setiap tahapan proses dilakukan analisis. Analisis dilakukan terhadap bahan baku (logam, paduan U-7Mo.xZr, U-7Mo.xSi, U-7Mo.xTi hasil proses peleburan dan serbuk U-7Mo.xZr, U-7Mo.xSi, U-7Mo.xTi hasil proses hidriding-dehidriding-grinding mill.



Gambar 1. Alur proses pembuatan serbuk U-7Mo.xZr, U-7Mo.xSi, U-7Mo.xTi

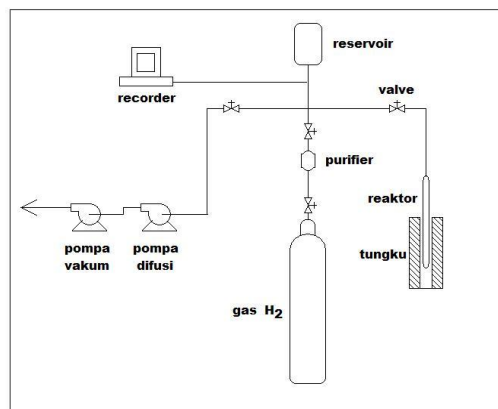
Analisis bahan baku merupakan awal penelitian sebelum dilakukan proses peleburan. Data analisis digunakan untuk perhitungan dalam menentukan komposisi berat masing-masing unsur logam untuk pembuatan paduan U-7Mo.xZr, U-7Mo.xSi, U-7Mo.xTi ($x = 1\%$, 2% , 3%). Kadar U dianalisis menggunakan Titroprocessor, sedangkan impuritas dalam logam U, serta kadar dan unsur penyusun logam Mo, Ti dan Zr dianalisis menggunakan AAS. Setelah diperoleh data analisis dilakukan perhitungan dan masing-

masing komposisi dilakukan proses peleburan. Paduan U-7Mo.xZr, U-7Mo.xSi, U-7Mo.xTi ($x = 1\%, 2\%, 3\%$) dibuat dengan teknik peleburan menggunakan tungku busur listrik bermedia gas argon seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Setiap peleburan paduan dilakukan 5 kali pengulangan agar diperoleh ingot paduan yang homogen. Ingot paduan hasil proses peleburan dianalisis/diuji meliputi: pengamatan strukturmikro menggunakan Mikroskop Optik, kekerasan menggunakan VHN, sifat termal menggunakan DTA (*Differential Thermal Analysis*), kapasitas panas menggunakan DSC (*Differential Scanning Calorimetry*), dan berat jenis menggunakan metode *immerse*.



Gambar 2. Pembuatan paduan U-7Mo.xZr, U-7Mo.xSi, U-7Mo.xTi menggunakan tungku busur listrik.

Ingot paduan U-7Mo.xZr, U-7Mo.xSi, U-7Mo.xTi setelah selesai dilakukan analisis maupun pengujian dilanjutkan proses perapuhan ingot paduan dengan teknik *hydride-dehydride* dengan skema proses seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Paduan yang sudah rapuh diubah menjadi serbuk menggunakan alat *grinding mill* yang dilakukan di dalam *glove box* dengan media gas argon.

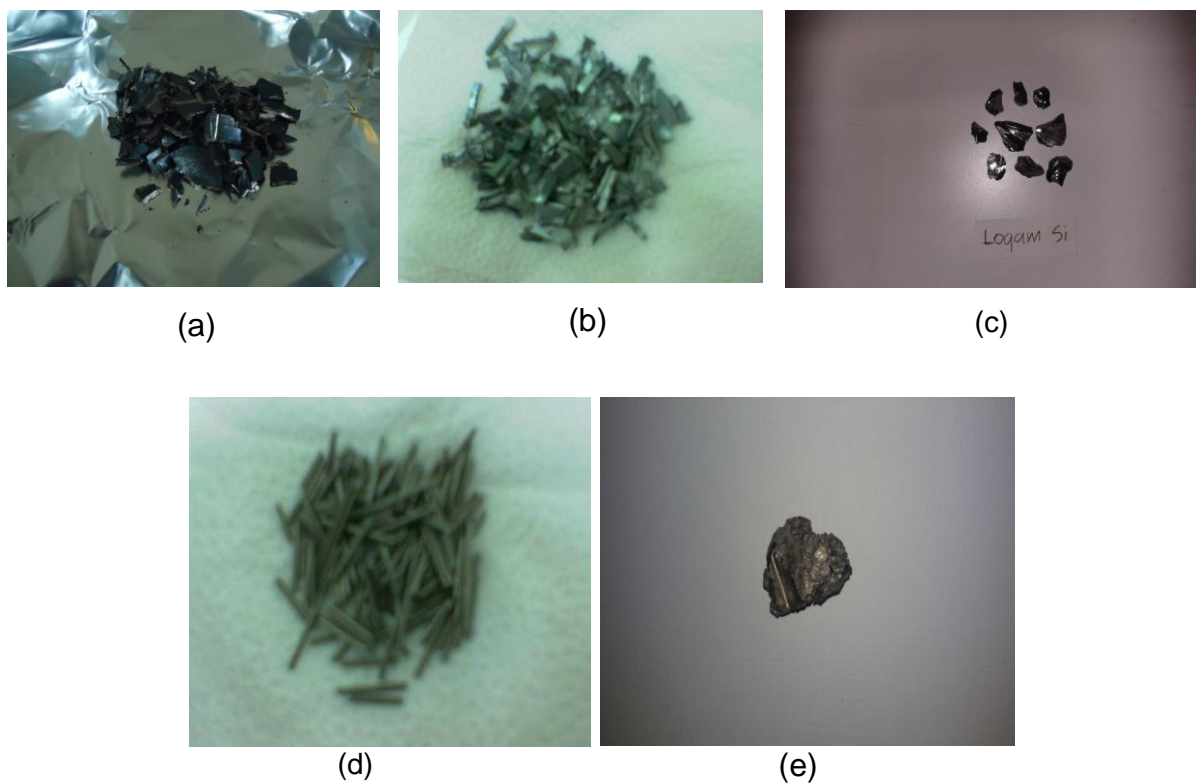


Gambar 3. Skema proses *hydride - dehydride*

Kadar U dianalisis menggunakan Titroprocessor dan impuritas menggunakan AAS, sifat termal menggunakan DTA, kapasitas panas menggunakan DCS, berat jenis menggunakan metode piknometri dan fraksi butir menggunakan ayakan yang telah memenuhi standar ASTM.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian menggunakan bahan baku dalam bentuk logam uranium deplesi, logam (Mo, Si, Ti, dan Zr). Permukaan logam uranium deplesi dibersihkan dengan proses pikling, kemudian dipotong-potong dengan ukuran kecil – kecil, seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Tujuan pemotongan adalah agar memudahkan pada penimbangan sesuai dengan komposisi berat yang telah ditentukan.



Gambar 4. Bahan baku pembuatan paduan U-7Mo.xZr, U-7Mo.xSi, dan U-7Mo.xTi,
(a). Logam U deplesi, (b). Logam Mo, (c). Logam Si,
(d). logam Ti, (e). logam Zr

Hasil analisis kadar uranium menggunakan Titroprocessor dan kadar impuritas yang terdapat dalam logam uranium, Mo, Zr, Si dan Ti menggunakan *Atomic Absorption Spektrophotometer* (AAS) ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data hasil analisis logam U, Zr, Si, dan Ti

No	Unsur pengotor	Kadar Dalam Sampel (ppm)				Keterangan
		U logam	Ti wire	Zr ingot	Mo stripe	
1	Cd	ttd	ttd	ttd	1,68	ttd=<0,2
2	Fe	8,25	28,39	175,67	35,07	
3	Co	ttd	11,51	5,14	11,30	ttd=<0,5
4	Mn	ttd	ttd	ttd	3,14	ttd=<0,2
5	Mg	2,49	0,42	3,25	0,27	
6	Cu	ttd	19,81	14,10	7,25	ttd=<0,2
7	Cr	ttd	ttd	159,74	ttd	ttd=<0,5
8	Ni	ttd	225,47	107,19	60,94	ttd=<0,5
9	Al	ttd	ttd	334,60	9475,23	ttd=<5,0
10	Si	ttd	2788,75	2860,87	ttd	ttd=<15,0

ttd: tidak terdeteksi

Pentingnya diketahui kadar masing-masing logam tersebut karena dalam penggunaannya sebagai bahan bakar keberadaan unsur-unsur tersebut berpengaruh terhadap sifat fisis, mekanik, kimia dan neutroniknya dan pada akhirnya berpengaruh terhadap unjuk kerjanya. Selain itu kadar U hasil analisis digunakan sebagai dasar perhitungan untuk menentukan komposisi berat masing-masing pemadu pada pembuatan paduan U-7Mo.xZr, U-7Mo.xSi, dan U-7Mo.xTi.

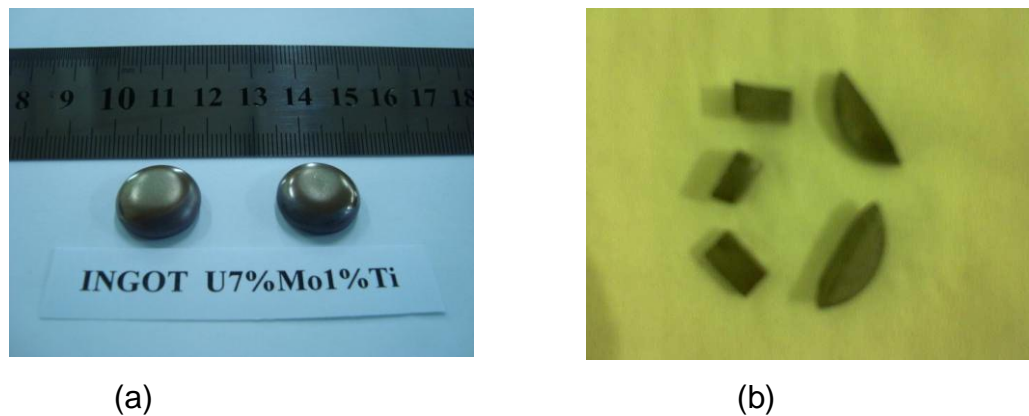
a. Paduan U-7Mo.xZr, U-7Mo.xSi, dan U-7Mo.xTi

Berdasarkan data analisis bahan baku komposisi peleburan untuk pembuatan paduan U-7Mo.xZr, U-7Mo.xSi, dan U-7Mo.xTi dapat dihitung dan komposisi yang dihasilkan seperti ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Komposisi peleburan

Paduan	Berat logam, g				
	U	Mo	Si	Ti	Zr
U-7Mo	-	-	-	-	-
U-7Mo-1Zr	15,1163	1,1371	-	-	0,1643
U-7Mo-2Zr	14,9937	1,1282	-	-	0,3299
U-7Mo-3Zr	14,9653	1,1241	-	-	0,4987
U-7Mo-1Ti	21,309	1,6010	-	0,229	-
U-7Mo-2Ti	20,534	1,5460	-	0,450	-
U-7Mo-3Ti	20,433	1,5380	-	0,679	-
U-7Mo-1Si	20,0172	1,5052	0,2168	-	-
U-7Mo-2Si	20,0994	1,5113	0,4389	-	-
U-7Mo-3Si	20,0627	1,5086	0,6659	-	-

Paduan dibuat dengan teknik peleburan menggunakan tungku busur listrik 150 ampere bermedia gas argon (Gambar 2). Setiap komposisi paduan (U + Mo + Si), (U + Mo + Ti), dan (U + Mo + Zr) dilebur dengan lima kali pengulangan sehingga diperoleh paduan U-7Mo.xZr, U-7Mo.xSi, dan U-7Mo.xTi yang masif, tidak teramati adanya pori dan lapisan oksida dipermukaannya seperti ditunjukkan pada contoh Gambar 5. Ingot paduan U-7Mo.xZr, U-7Mo.xSi, dan U-7Mo.xTi hasil peleburan berukuran diameter rerata sekitar 20 mm dan tebal sebesar 5 mm, bersifat ulet sehingga tidak bisa langsung dibuat menjadi serbuk secara mekanik. Paduan hasil peleburan selanjutnya dipotong-potong menggunakan mesin potong menjadi beberapa bagian (dilakukan di dalam *glove box*). Contoh potongan paduan U-7Mo-xTi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Potongan tersebut selanjutnya dilakukan untuk pengujian maupun analisis, dan sebagian lainnya diproses menjadi serbuk dengan teknik *hydride-dehydride-grinding mill*.



Gambar 5. Ingot paduan U-7Mo-1Ti, (a) hasil peleburan, (b) potongan hasil peleburan

Kekerasan

Keberadaan unsur Ti atau Zr didalam paduan U-7Mo memperhalus struktur butir ingot paduan yang dihasilkan. Semakin tinggi kadar Ti atau Zr maka pada saat pembekuan unsur Ti atau Zr membentuk inti baru sehingga struktur butir semakin halus. Hasil uji pada Tabel 3 menunjukkan bahwa kenaikan kadar Ti atau Zr menyebabkan kekerasannya meningkat. Peningkatan kekerasan kemungkinan disebabkan oleh larutan padat Mo dan Ti atau Zr berdifusi ke dalam kisi kristal α -U yang cenderung terjadi distorsi kisi yang berakibat menimbulkan medan tegangan disekitar atom yang larut serta adanya penghalusan butir. Ukuran butir semakin kecil maka batas butirnya semakin banyak, maka dislokasi menjadi terhambat sehingga paduan menjadi lebih kuat.

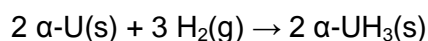
Tabel 3. Hasil uji kekerasan ingot paduan U-7Mo, U-7Mo-xZr, U-7Mo-xTi

No	Paduan	Kekerasan rerata, VHN
1	U-7Mo	240,4
2	U-7Mo-1Zr	294,6
3	U-7Mo-2Zr	314,6
4	U-7Mo-3Zr	333,2
5	U-7Mo-1Ti	300,6
6	U-7Mo-2Ti	324,4
7	U-7Mo-3Ti	340,2
8	U-7Mo-1Si	-
9	U-7Mo-2Si	-
10	U-7Mo-3Si	-

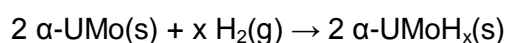
b. Perapuhan paduan U-7Mo.xZr, U-7Mo.xSi, dan U-7Mo.xTi

Paduan U-7Mo.xZr, U-7Mo.xSi, dan U-7Mo.xTi hasil peleburan yang ulet dirapuhkan terlebih dahulu agar mudah dibuat menjadi serbuk dengan cara mekanik. Proses perapuhan dilakukan dengan teknik hidriding-dehidriding seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Paduan dimasukkan ke dalam reaktor gelas dan direaksikan dengan gas hidrogen yang dimulai pada tekanan 1,1 bar dan temperatur 350°C sehingga terjadi reaksi antara U-7Mo.xZr, U-7Mo.xSi, dan U-7Mo.xTi dengan H₂ membentuk U-7Mo.xZr H_y, U-7Mo.xSi H_y, dan U-7Mo.xTi.H_y yang bersifat rapuh. Terjadinya reaksi ditandai dengan penurunan tekanan di dalam reaktor. Apabila tekanan turun, maka ditambahkan gas H₂ hingga tekanan sama seperti tekanan semula yaitu sebesar 1,1 bar. Demikian seterusnya, dan apabila sudah tidak terjadi penurunan tekanan, hal itu menunjukkan bahwa sudah tidak terjadi reaksi maka diturunkan temperatur menjadi 300°C, biarkan sampai tekanan konstan, demikian seterusnya dilakukan hingga mencapai temperatur ruangan dan reaksi stoichiometrinya tercapai.

Metode ini mudah dilakukan karena prinsip dasar yang digunakan adalah reaksi antara logam dengan gas hidrogen (H₂). Logam U mudah bereaksi dengan gas H₂ di sepanjang jalur temperatur, namun hanya dalam bentuk fasa α, tidak demikian halnya ketika berada pada fasa γ. Reaksi U / αU dapat bereaksi dengan gas H₂ seperti ditunjukkan dalam persamaan reaksi berikut.

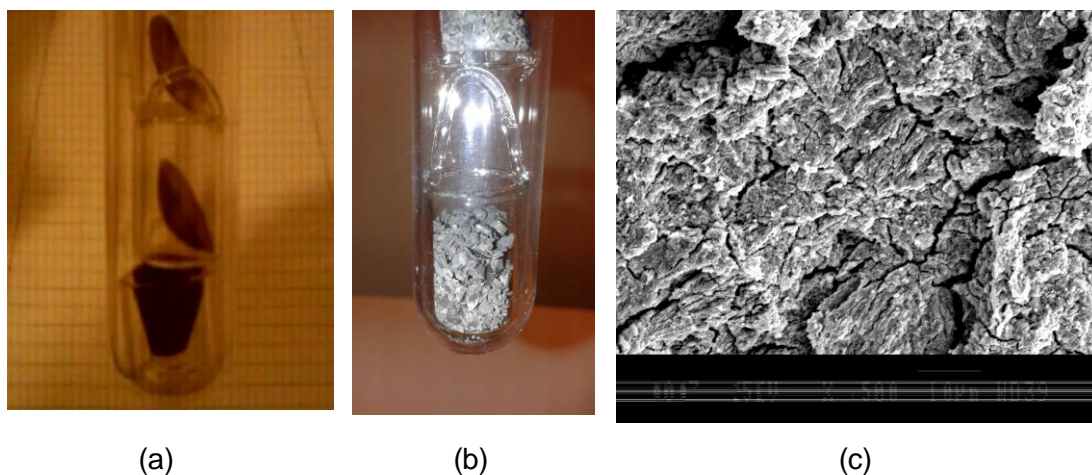


atau dalam bentuk paduan,



Hasil proses *hydride-dehydride* ditunjukkan pada Gambar 6. Paduan U-7Mo-xTi yang dikenai proses *hydride-dehydride* disusun secara bertingkat di dalam tabung reaksi (*retort*) yang terbuat dari gelas seperti ditunjukkan pada Gambar 6.a. Penyusunan paduan tersebut dirancang agar pada saat proses *hydride* (terjadi reaksi antara paduan dengan

gas H_2 dan tidak terjadi panas yang berlebihan disuatu titik (*hot spot*) yang berpotensi menyebabkan retort pecah sehingga paduan terkontaminasi oleh pecahan gelas. Proses *hydride-dehydride* setiap paduan dilakukan di dalam retort yang sama dan diperoleh paduan U-7Mo-xTi yang rapuh seperti ditunjukkan pada Gambar 6.b. Hasil pengamatan morfologi partikel serbuk menggunakan *Scanning Electron Microscop* (SEM) ditunjukkan pada Gambar 6.c. Pada permukaan partikel serbuk U-7Mo-xTi (Gambar 6.c) terlihat adanya retakan-retakan yang mengindikasikan bekas adanya penyerapan gas hidrogen dan terjadinya reaksi antara gas hidrogen dengan logam paduan membentuk hidrid. Retakan cenderung menjalar disepanjang batas butir. Hal inilah yang menyebabkan paduan U-7Mo-xTi rapuh sehingga mudah diubah menjadi serbuk secara mekanik. Sifat rapuh paduan U-7Mo-xTi terbukti pada proses pembuatan serbuk dengan teknik *grinding-mill* dapat dilakukan dengan mudah menjadi butiran-butiran kecil sesuai yang dipersyaratkan bahan bakar dispersi.



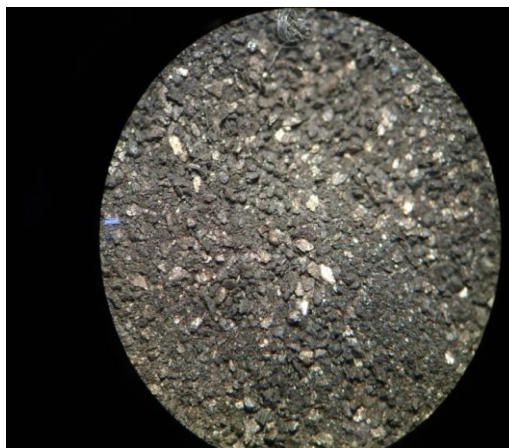
(a) (b) (c)
 Gambar 6. Proses proses hidriding-dehidriding paduan U-7Mo-xTi
 (a). Sampel ingot paduan U-7Mo-xTi hasil peleburan
 (b). Ingot paduan U-7Mo-xTi setelah proses hidriding-dehidriding
 (c). Morfologi serbuk hasil hidriding – dehidriding paduan U-7Mo-Ti, dengan perbesaran 1500X

c. Pembuatan serbuk U-7Mo-xSi

Paduan U-7Mo.xZr, U-7Mo.xSi, dan U-7Mo.xTi hasil proses dehidriding yang telah terbebas dari hidrogen diubah menjadi serbuk dengan menggunakan *ball mill* yang dilakukan di dalam *glove box* bermedia gas argon. Serbuk yang diperoleh sangat reaktif terhadap oksigen didalam udara, oleh karena itu penanganannya diupayakan selalu dalam kondisi vakum atau dalam media gas inert. Serbuk U-7Mo.xZr, U-7Mo.xSi, dan U-7Mo.xTi selanjutnya diayak menggunakan ayakan standar ASTM berukuran lubang ayakan 90 dan 38 μm untuk mendapatkan fraksi ayak serbuk berukuran $-90 + 38 \mu m$

antara 75 – 85 % dan - 38 μm antara 15 – 25 %, hal ini sesuai dengan persyaratan bahan bakar yang telah ditetapkan. Hasil serbuk U-7Mo.xZr, U-7Mo.xSi, dan U-7Mo.xTi hasil ayak seperti ditunjukkan pada Gambar 7, kemudian dianalisis kadar uranium dan impuritas serta berat jenisnya.

Paduan U-7Mo-xSi, U-7Mo-xTi, dan U-7Mo-xZr berbasis U-7Mo dengan penambahan unsur Si/Ti/Zr masing-masing 1%, 2% dan 3%. semakin tinggi unsur logam yang ditambahkan kadar U menurun dan berat jenisnya juga menurun. Berat jenis unsur Si/Ti/Zr diperoleh sebesar Si = 2,4 g/cm^3 , Ti = 4,5 g/cm^3 , Zr = 6,4 g/cm^3 . Berat jenis tersebut lebih rendah dari berat jenis U dan Mo yang masing-masing sebesar 18,485 g/cm^3 dan 10,2 g/cm^3 . Walaupun penambahan unsur Si/Ti/Zr menurunkan densitas paduan, namun penurunannya tidak signifikan dan densitas paduan masih cukup tinggi sehingga dalam penggunaan sebagai bahan bakar masih lebih tinggi dibandingkan dengan $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$.



Gambar 7. Serbuk U-7Mo-xTi.

Tabel 4. Data analisis serbuk U-7Mo-xSi, U-7Mo-xTi, dan U-7Mo-xZr

Serbuk	Kadar U, %	Densitas, g/cm^3
U-7Mo-1Si	92,16	15,9000
U-7Mo-2Si	91,39	15,8700
U-7Mo-3Si	90,67	15,7800
U-7Mo-1Ti	91,85	17,1786
U-7Mo-2Ti	90,74	16,7096
U-7Mo-3Ti	89,08	16,2713
U-7Mo-1Zr	92,19	17,3517
U-7Mo-2Zr	91,09	17,0335
U-7Mo-3Zr	90,72	16,8721

Hasil pengujian dengan DTA menunjukkan bahwa dari ketiga paduan tersebut terjadi perubahan fasa dan reaksi endotermik maupun eksotermik pada temperatur diatas

500°C. Hasil analisis termal menggunakan DTA menunjukkan bahwa paduan UMoTi, UMoZr dan UMoSi mempunyai kompatibilitas panas yang baik hingga temperatur 500°C. Bila mengacu pada operasi reaktor riset bahwa hanya pada temperatur 150°C dan temperatur bahan bakar tertinggi hanya sampai 300°C, maka material tersebut cukup baik.

Hasil pengukuran kapasitas panas (C_p) menggunakan alat DSC pada rentang temperatur antara 25 – 450°C dengan kecepatan pemanasan 10°C/menit menunjukkan bahwa nilai C_p naik seiring dengan kenaikan temperatur. Data pengukuran C_p paduan U-7Mo berkisar antara 0,11 – 0,19 J/g.K dan C_p logam Ti antara 0,56 – 0,65 J/g.K. Setelah unsur Ti dipadukan ke dalam paduan U-7Mo membentuk U-7Mo-xTi ($x=1\%$, 2% , dan 3%), maka tidak terjadi perubahan nilai C_p yang signifikan.

KESIMPULAN

Pembuatan ingot paduan UMoTi, UMoZr dan UMoSi dengan teknik peleburan menggunakan tungku busur listrik dengan arus 150 ampere dan 5 x pengulangan diperoleh hasil yang baik sesuai dengan karakteristik paduan yang diperlukan sebagai bahan bakar. Ingot paduan UMoTi, UMoZr dan UMoSi yang dihasilkan bersifat ulet dan diubah menjadi serbuk dengan teknik *hydride - dehydride - grinding mill*. Proses *hydride* dilakukan pada temperatur 300°C - temperatur ruangan dalam media gas H_2 tekanan 1,1 bar hingga membentuk paduan hidrida dan dilanjutkan dehidriding pada temperatur 500°C sambil divakum hingga diperoleh kembali paduan UMoTi, UMoZr dan UMoSi yang rapuh. Paduan yang rapuh dibuat menjadi serbuk dengan cara ditumbuk di dalam *glove box* bermedia gas argon sehingga diperoleh serbuk dengan ukuran butir <150 μm .

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Ka. PTBBN dan seluruh pegawai PTBBN atas kerjasama dan bantuan yang telah diberikan sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik sehingga dapat dituangkan di dalam makalah ini. Semoga tulisan ini bermanfaat untuk penelitian bahan bakar reaktor riset berbasis UMo di PTBBN dimasa mendatang.

DAFTAR PUSTAKA

1. Luis Olivares, et.al, "Nuclear Fuel Development Based on UMo Alloys Under Irradiation Evaluation of LEU U_3Si_2 -4,8gU/cm³ Test Fuel", The RERTR-2007 International Meeting on RERTR, Prague, Czech Republic, September 23-27, 2007.

2. Supardjo, "Studi Proses Pembuatan Serbuk UMo Sebagai Bahan Bakar Dispersi UMo-Al untuk Reaktor Riset", Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir, Yogyakarta, 10 Juli 2007.
3. Leenaers. A., et.al, "Post Irradiation Examination of Uranium - 7% Molybdenum Atomized Dispersion Fuel", 8th International Topical Meeting on RRFM, Germany, March 21-24, 2004.
4. Jong Man Park, et.al, "Phase Stability of UMoTi Alloys and Interdiffusion Behaviors of UMoTi/AlSi", The RERTR-2007 International Meeting on RERTR, Prague, Czech Republic, September 23-27, 2007.
5. Rodier, X., et.al, "Effects of Ti in the UMo/Al system: Preliminary Result", 11th International Topical Meeting of Research Reactor Fuel Management, RRFM and Meeting of the International Group IGORR, Lyon, France, March, 11-15, 2007.
6. J.M. Park, et.al., "Interdiffusion Behavior of UMoZr/AlSi", Proc 2006 RERTR International Meeting, Cape Town, South Africa, Oct. 29 Nov.2, 2006.
7. J.L. Snelgrove, et.al., "Qualification of Uranium Molybdenum Alloy Fuel Conclusions of an International Workshop", 4th International Topical Meeting of Research Reactor Fuel Management, RRFM 2000, Colmar, France, 19-21 March 2000.
8. Solonin, M.I., et.al, "Development of the Method of High Density Fuel Comminution by Hydride-Dehydride Processing", International RERTR Meeting Program, Las Vegas, Nevada, October 1-6, 2000.