

## PEMBUATAN DAN KARAKTERISASI PADUAN UMo SEBAGAI KANDIDAT BAHAN BAKAR NUKLIR TIPE DISPERSI

Supardjo dan Masrukan  
Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir – BATAN, Serpong  
(Diterima 19 Maret 2008, disetujui 24 Oktober 2008)

### ABSTRAK

**PEMBUATAN DAN KARAKTERISASI PADUAN UMo SEBAGAI KANDIDAT BAHAN BAKAR NUKLIR TIPE DISPERSI.** Dalam rangka pengembangan bahan bakar dispersi UMo-Al berpengayaan rendah ( $< 20\% \text{ }^{235}\text{U}$ ) telah dilakukan pembuatan paduan UMo kadar 7, 8, 9, 10 dan 11% Mo. Paduan UMo dibuat dengan teknik peleburan di dalam tungku busur listrik bermedia gas argon dengan tekanan 0,6 bar. Peleburan setiap paduan dilakukan 5 kali dan ingot yang diperoleh dibuat serbuk dengan cara mekanik (penumbukan). Hasil uji menunjukkan bahwa ingot sangat ulet, mikrostruktur pada bagian dekat pendingin memanjang dan bagian tengah membesar, sedangkan kekerasan cenderung naik dengan meningkatnya kadar Mo. Keuletan ingot menyebabkan pembuatan serbuk dengan cara penumbukan sulit dan serbuk yang dihasilkan berbentuk pipih. Data uji difraksi sinar-X menunjukkan bahwa pada komposisi 7% Mo didominasi fase  $\alpha\text{U}$  dan pada 11% didominasi oleh fase  $\delta_2\text{-U}_2\text{Mo}$ . Fase  $\alpha\text{-U}$  yang mempunyai struktur kristal ortorombik terdapat pada sudut  $2\theta$  masing-masing sebesar  $26,9^\circ$ ;  $33,9^\circ$ ;  $38,8^\circ$ ;  $52,9^\circ$  dan  $78,4^\circ$  serta pada bidang 011, 020, 110, 121 dan 211 sedangkan fase  $\delta_2\text{-U}_2\text{Mo}$  muncul pada sudut  $2\theta$  sebesar  $28,02^\circ$ ;  $37,02^\circ$ ;  $38,10^\circ$ ;  $53,60^\circ$  dan  $67,36^\circ$  serta pada bidang 101, 110, 203, 200 dan 213. Kualitas ingot UMo hasil peleburan cukup baik, meski mengalami kesulitan dalam membuat serbuk dengan penumbukan. Oleh karena itu perlu dipilih metode proses pembuatan serbuk yang sesuai.

**KATA KUNCI:** Paduan UMo, Bahan bakar tipe dispersi, Difraksi sinar-X, Kristal ortorombik

### ABSTRACT

**PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF UMo ALLOY AS CANDIDATE OF NUCLEAR FUEL DISPERSION TYPE.** In order to develop low enrichment ( $< 20\% \text{ }^{235}\text{U}$ ) UMo-Al dispersion fuel, experiment has been conducted to prepare UMo alloy with 7, 8, 9, 10 and 11% Mo respective ly. Each UMo alloy was prepared by arc melt technique in argon gas medium. The melting of every alloy was performed 5 times, and then the alloys were powdered by mechanical method (grinding and milling). Examination of the results showed that the alloys were very ductile, microstructures of the areas near the cooling were stretched lengthwise while the middle parts enlarged, and the hardness had a tendency to increase with increasing Mo content. The ductility of the ingots caused difficulty in powder production by grinding and milling, and the produced powder was flat in form. Examination of X-ray diffraction data indicated that at 7% composition the alloy was dominated by  $\alpha\text{U}$  phase and at 11% Mo composition by  $\delta_2\text{-U}_2\text{Mo}$ . The  $\alpha\text{U}$  phase with orthorombic crystal structure was observed at angle  $2\theta$  of  $26.9^\circ$ ,  $33.9^\circ$ ,  $38.8^\circ$ ,  $52.9^\circ$  and  $78.4^\circ$  as well as in the planes of 011, 020, 110, 121 and 211 whereas the  $\delta_2\text{-U}_2\text{Mo}$  phase appeared at angle  $2\theta$  of  $28.02^\circ$ ,  $37.02^\circ$ ,  $38.10^\circ$ ,  $53.60^\circ$  and  $67.36^\circ$  in the planes of 101, 110, 203, 200 with 213. The quality of UMo alloy obtained by melting was quite satisfactory despite difficulties encountered in preparing

*the powder by grinding and milling. Therefore, it is necessary to choose a reliable manufacturing process.*

*FREE TERMS: UMo alloy, Dispersion fuel, X-ray diffraction, Orthorhombic crystal*

## I. PENDAHULUAN

Penelitian dan pengembangan bahan bakar dispersi densitas uranium tinggi berbasis uranium pengayaan rendah ( $< 20\% U^{235}$ ) terus dilakukan oleh negara yang tergabung dalam program *Reduced Enrichment Research and Test Reactor (RERTR)* dan *Research Reactor Fuel Management (RRFM)*. Peningkatan densitas uranium bahan bakar dispersi  $UAl_x-Al$ ,  $U_3O_8-Al$ ,  $U_3Si_2-Al$  telah menunjukkan hasil yang cukup signifikan, yaitu masing-masing 2,3; 3,2 dan  $4,80 \text{ g/cm}^3$ <sup>[1]</sup>. Densitas uranium tersebut sudah meningkat, tetapi jumlah  $U^{235}$  nya belum sesuai yang diharapkan yaitu minimal sama dengan yang terdapat di dalam bahan bakar uranium pengayaan tinggi (tanpa mengubah desain teras reaktornya). Walaupun demikian, hingga saat ini lebih dari 20 reaktor riset di dunia telah mengganti penggunaan bahan bakar dari pengayaan tinggi ( $> 90\% U^{235}$ ) ke bahan bakar  $U_3Si_2-Al$  dengan uranium pengayaan rendah, dan beberapa reaktor baru langsung menggunakan bahan bakar ini<sup>[2]</sup>. Keunggulan bahan bakar  $U_3Si_2-Al$  adalah mudah difabrikasi dan stabilitas iradiasinya sangat baik, namun penggunaan bahan bakar tersebut memiliki kelemahan yaitu proses olah ulang gagal fabrikasi / bahan bakar bekasnya sangat sulit. Selain itu densitas uranium bahan bakar  $U_3Si_2-Al$  sebesar  $4,8 \text{ g/cm}^3$  masih jauh dari yang dicanangkan dalam program *RERTR* yaitu antara  $8 - 9 \text{ g/cm}^3$ <sup>[3]</sup>. Oleh karena itu penelitian lebih lanjut diarahkan menggunakan bahan bakar baru paduan UMo yang memiliki densitas teoritis sekitar  $16,4 \text{ g/cm}^3$ .

Paduan UMo dibuat dengan teknik peleburan terhadap campuran logam U dan Mo. Sebagai bahan bakar dispersi, maka ingot UMo hasil peleburan diubah menjadi serbuk hingga diperoleh fraksi butiran serbuk yang sesuai persyaratan. Teknik pembuatan serbuk dapat dilakukan melalui beberapa cara di antaranya: penumbukan mekanik (*milling, grinding*) atau dengan menambahkan unsur pemadu untuk meningkatkan kerapuhan, penumbukan mekanik kriogenik, *hydride-dehydride* dan proses atomisasi<sup>[4]</sup>.

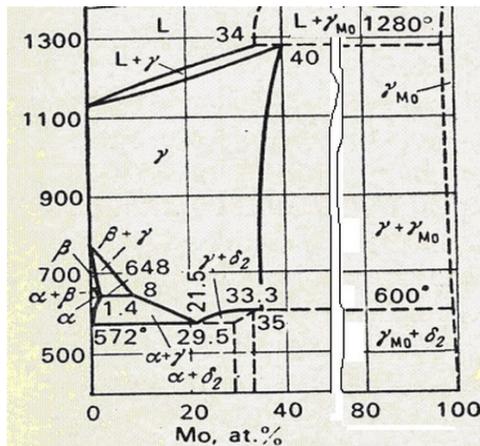
Pada penelitian ini, paduan UMo dibuat dengan teknik peleburan di dalam tungku busur listrik bermedia gas argon pada tekanan 0,6 bar. Ingot hasil lebur dibuat serbuk dengan cara *milling* dan *grinding*. Penentuan kualitas ingot hasil peleburan dan serbuk UMo dilakukan dengan pengujian mikrostruktur dan kekerasan ingot serta komposisi fase yang terdapat di dalam serbuk.

Ketersediaan fasilitas fabrikasi bahan bakar dispersi tipe pelat di PT. BATAN Teknologi (persero), fasilitas uji iradiasi Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy (RSG-GAS) dan fasilitas uji pasca iradiasi yang dimiliki BATAN serta pengalaman pegawai tentang litbang/fabrikasi bahan bakar  $U_3Si_2-Al$ , maka mendorong untuk melakukan litbang bahan bakar UMo. Hasil penelitian ini diharapkan dapat digunakan sebagai dasar penelitian lebih lanjut, hingga diperoleh bahan bakar UMo-Al yang memenuhi persyaratan bahan bakar reaktor riset.

## II. TEORI

Paduan UMo merupakan paduan sistem biner dengan diagram fase seperti pada Gambar 1. Paduan membentuk reaksi peritektik pada suhu  $1280 \text{ }^\circ\text{C}$  dengan fase  $\gamma$  maksimum pada komposisi 40% Mo. Pada suhu yang lebih rendah ( $< 648 \text{ }^\circ\text{C}$ ) terjadi reaksi keseimbangan /

reaksi eutektik antara fase  $\beta$  (1,4% atom Mo) menjadi  $\alpha$  (0,1% atom Mo) dan fase  $\delta_2$  (8% atom Mo), sementara itu keseimbangan antara fase  $\gamma$  (21,5% atom) dengan  $\alpha$  (< 0,1% atom) dan  $\delta_2$  terjadi pada suhu 572 °C<sup>[5]</sup>. Untuk mengubah campuran fase  $\alpha$ -U dan fase  $\delta$ -(U<sub>2</sub>Mo) menjadi fase  $\gamma$  dapat dilakukan proses *quenching*, yaitu dengan memanaskan paduan pada suhu fase  $\gamma$  dan ditahan beberapa waktu kemudian didinginkan cepat ke dalam media pendingin. Melalui proses ini unsur Mo tidak sempat lepas dari kisi-kisi U sehingga tetap berada dalam fase  $\gamma$ .



Gambar 1. Diagram fase paduan UMo<sup>[5]</sup>

Paduan UMo memiliki densitas sekitar 16,4 g/cm<sup>3</sup>, tahan terhadap korosi,ampang lintang serapan neutron Mo rendah, namun paduan bersifat ulet (*ductile*) sehingga sulit dibuat serbuk dengan cara mekanik. Densitas tersebut lebih tinggi dibandingkan dengan densitas paduan uranium / oksida uranium yang telah digunakan sebagai bahan bakar reaktor riset seperti U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>, U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> dan UAl<sub>x</sub> yang masing-masing sebesar 12,2; 8,4 dan 6,7 g/cm<sup>3</sup>. Menggunakan paduan UMo untuk bahan bakar tipe dispersi, densitas uranium di dalam *meat* PEB dapat ditingkatkan menjadi 9,0 g/cm<sup>3</sup> sesuai dengan yang diperlukan sebagian reaktor penelitian terkait penggunaan uranium pengayaan rendah<sup>[6]</sup>. Kelebihan lain paduan UMo sebagai bahan bakar reaktor riset adalah proses olah ulang yang lebih mudah dibandingkan bahan bakar U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub><sup>[7]</sup>.

### III. TATA KERJA

#### 3.1. Bahan

Bahan yang digunakan adalah logam uranium deplesi dengan kemurnian 98,19% dan logam Mo dengan kemurnian 99,95%.

#### 3.2. Alat

Alat yang digunakan mencakup tungku busur listrik, mesin bubut, cawan dan penumbuk berbahan baja, alat preparasi uji metalografi, mikroskop optik dan difraksi sinar-X.

### 3.3. Cara Kerja

Paduan UMo berkadar masing-masing 7, 8, 9, 10 dan 11 % Mo, dibuat melalui proses peleburan di dalam tungku busur listrik bermedia gas argon pada tekanan 0,6 bar. Setiap komposisi paduan dilebur selama 1 menit dengan 5 kali pengulangan<sup>[8]</sup>. Ingot UMo hasil peleburan dipotong-potong menjadi beberapa bagian untuk disiapkan sebagai sampel uji. Sebagian ingot di-*mounting* dan diampelas sampai halus untuk sampel uji mikrostruktur dan kekerasan, sedangkan ingot yang lain dibuat serbuk. Pembuatan serbuk dengan cara pembubutan dan serpihan yang diperoleh ditumbuk menjadi serbuk (menggunakan cawan dan mortar baja), selanjutnya disiapkan untuk pengujian komposisi fase. Sampel uji ingot UMo yang telah diampelas dikenai pengujian mikrostruktur dengan mikroskop optik dan kekerasan dengan cara Brinell, sedangkan sampel serbuk diuji dengan difraksi sinar-X untuk mengetahui komposisi fasenya.

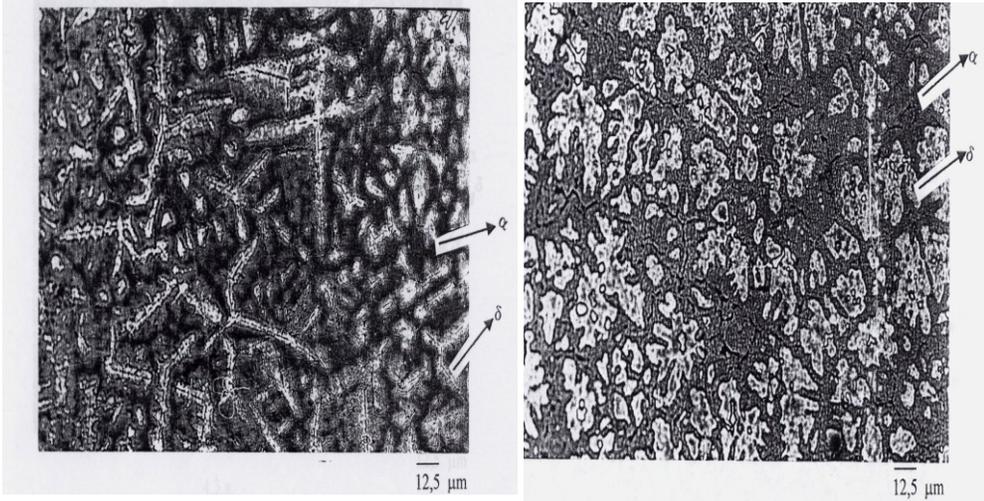
## IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada proses peleburan terjadi pencairan logam U dan Mo dan bereaksi membentuk  $U_xMo$ . Selama proses peleburan busur listrik digerakkan searah jarum jam dengan jarak antara ujung busur listrik dan permukaan campuran logam U dan Mo yang dilebur diupayakan tetap. Gerakan busur listrik selain untuk pelelehan, juga berfungsi untuk mempercepat reaksi dan homogenisasi. Pada setiap proses peleburan dengan teknik ini, logam U dan Mo pada bagian atas mencair sedangkan yang berada di bagian bawah dan bersinggungan dengan cawan lebur tidak mencair sempurna karena panas peleburan diserap oleh air pendingin yang mengalir di bawah dasar cawan. Oleh karena itu agar hasil lebur diperoleh ingot UMo yang homogen, maka peleburan dilakukan berulang-ulang dengan cara, setiap selesai peleburan ingot dibalik dan dilebur lagi. Ingot UMo hasil peleburan (dengan 5 kali pengulangan) berbentuk lempengan dengan diameter sekitar 45 mm dan tebal 5 mm. Secara visual ingot UMo cukup baik, tidak terdapat pori dan pada seluruh permukaannya tidak terlihat adanya oksida uranium.

Mikrostruktur ingot untuk semua kadar Mo pada penelitian ini memiliki kecenderungan dan pola yang sama. Mikrostruktur ingot UMo dengan kadar 7 dan 11 % Mo masing-masing ditunjukkan pada Gambar 2 (a-b) dan 3 (a-b). Bagian pinggir ingot yang bersinggungan dengan cawan peleburan terbentuk butiran bulat seragam (berupa dendrit), kemudian ke arah tengah butiran denrit memanjang dan bagian tengah, denrit berbentuk bulat seragam. Hal ini terjadi karena saat proses peleburan berlangsung, bagian ingot yang bersinggungan dengan cawan peleburan lebih cepat mendingin dibandingkan bagian tengah. Oleh karena terjadi pendinginan yang cukup cepat, maka pembentukan inti menjadi butir lebih cepat dibandingkan pertumbuhan butir sehingga terbentuk butir-butir yang seragam. Pada bagian yang agak ketengah pendinginannya lambat, sehingga kecepatan terbentuknya inti lebih rendah dibandingkan pertumbuhan inti. Akibatnya inti yang terbentuk lebih sedikit tetapi pertumbuhan inti menjadi butir yang memanjang lebih besar. Sementara itu, pada bagian tengah terjadi pendinginan yang lebih lambat dibanding pada bagian yang bersentuhan dengan permukaan cawan peleburan yang berakibat pertumbuhan butir dan pertumbuhan inti hampir sama sehingga terbentuk butir yang seragam. Selain itu, dari gambar stuktur mikro terlihat pula fase  $\alpha$  sebagai matriks dan fase  $\delta-(U_2Mo)$  sebagai fase kedua. Dari Gambar (2) dan (3) tersebut juga dapat ditunjukkan bahwa semakin tinggi kadar Mo di dalam paduan UMo, jumlah fase  $\delta-(U_2Mo)$  semakin bertambah.

Hasil pengujian kekerasan ingot UMo dengan kadar Mo sebesar 7, 8, 9, 10 dan 11% yang ditunjukkan pada Gambar 4 menunjukkan terdapat kecenderungan bahwa kekerasan

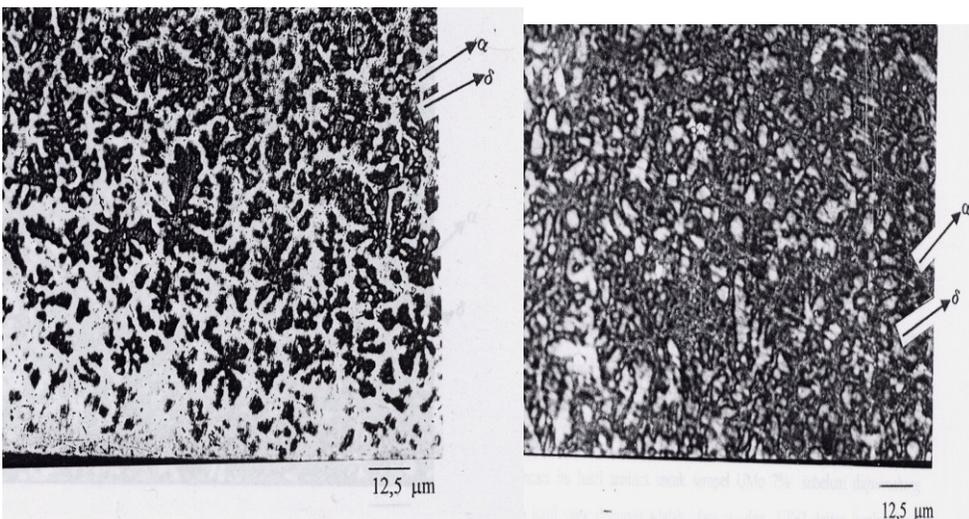
paduan UMo naik seiring dengan kenaikan kadar Mo. Nilai kekerasan naik mencapai kadar 10% Mo, namun terjadi penurunan pada kadar Mo 11%. Peningkatan kekerasan kemungkinan disebabkan adanya unsur Mo yang semakin besar baik sebagai larutan padat maupun fase. Larutan padat tersebut akan menimbulkan medan tegangan, sedangkan fase akan menghalangi gerakan dislokasi di sekitarnya, sehingga fenomena tersebut menyebabkan kenaikan kekerasan.



(a) Bagian pinggir

(b) Bagian tengah

Gambar 2. Mikrostruktur paduan U-7%Mo

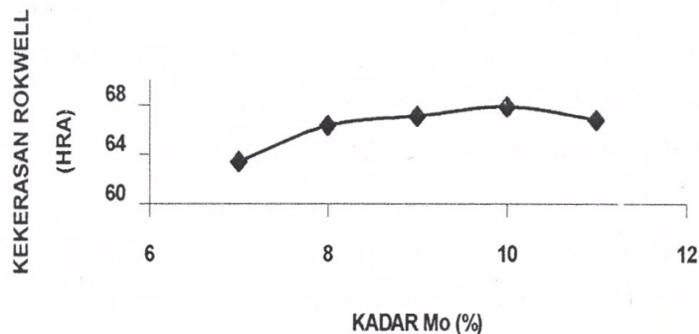


(a) Bagian pinggir

(b) Bagian tengah

Gambar 3. Mikrostruktur paduan U-11%Mo

Penurunan kekerasan ingot berkadar 11% Mo kemungkinan disebabkan oleh ketidak homogenan leburan UMo sehingga di tempat-tempat tertentu terdapat unsur Mo berlebihan sedangkan di tempat lain mengalami kekurangan unsur Mo baik sebagai larutan padat ataupun fase kedua. Karena paduan kurang homogen, maka pada saat uji kekerasan kemungkinan indenter mengenai bagian yang kekurangan unsur Mo sehingga menghasilkan kekerasan yang lebih rendah.



Gambar 4. Hubungan kekerasan ingot UMo dengan kadar Mo

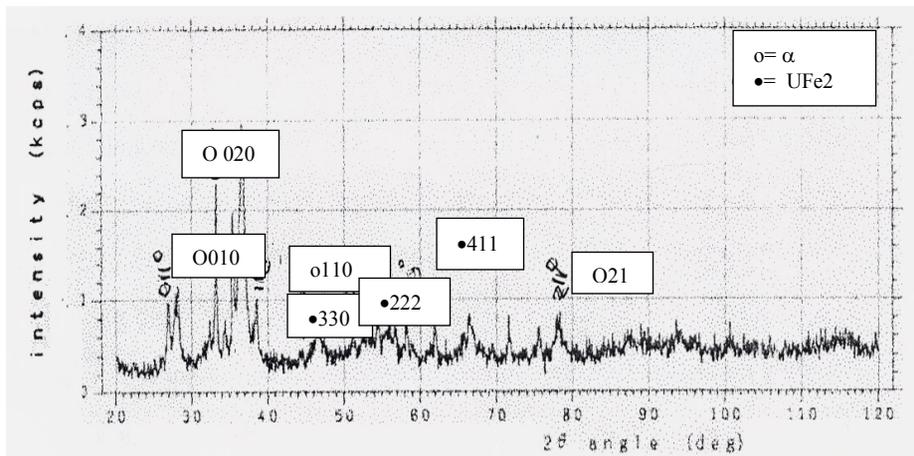
Paduan UMo sangat ulet, sehingga sulit dibuat serbuk dengan cara penggerusan/penggilingan. Keuletan tersebut disebabkan paduan UMo tersebut masih didominasi oleh fase  $\alpha$ U, dimana fase  $\alpha$ U tersebut mempunyai struktur kristal ortorombik, sedangkan fase  $\delta$ -UMo mempunyai struktur kristal tetragonal. Pada struktur kristal ortorombik kemungkinan dapat terbentuk *face-centered* yang mempunyai jumlah atom lebih banyak dibandingkan  $\delta$ -UMo yang mempunyai struktur kristal tetragonal. Oleh karena itu semakin tinggi kadar Mo dalam paduan Umo, keuletannya menurun sedangkan kekerasannya naik. Sifat ulet ingot dapat dibuktikan pada bentuk serbuk hasil proses penggilingan seperti ditunjukkan Gambar 5, dimana terlihat bahwa bentuk serbuk secara visual tidak beraturan dan cenderung pipih. Untuk bahan bakar dispersi, bentuk partikel serbuk menjadi pertimbangan. Secara ideal partikel serbuk berbentuk bola sehingga mampu alirnya baik, mudah dihomogenisasi dengan serbuk matriks Al dan pada proses pengerolan tidak terjadi aglomerasi di suatu titik/zona.



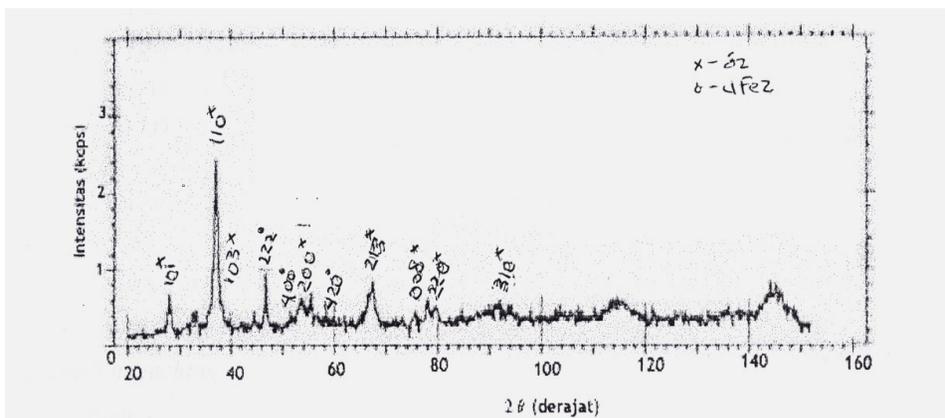
150  $\mu$ m

Gambar 5. Serbuk UMo hasil giling

Paduan UMo dengan komposisi 7 dan 11 % Mo diidentifikasi menggunakan difraksi sinar-X. Hasil analisis dengan menggunakan difraksi sinar-X terhadap sampel paduan U-7%Mo menunjukkan bahwa paduan didominasi oleh fase  $\alpha$ -U dan sejumlah  $UFe_2$  seperti terlihat pada Gambar 6 dan Tabel 1 pada lampiran. Fase  $\alpha$ -U yang mempunyai struktur kristal ortorombik terdapat pada sudut  $2\theta$ , masing-masing sebesar  $26,9^\circ$ ;  $38,8^\circ$ ;  $52,9^\circ$ ;  $78,4^\circ$  dan  $33,9^\circ$  serta pada bidang 011, 110, 121, 211 dan 020 dengan intensitas masing-masing sebesar 29, 26, 15, 18 dan 81. Fase  $UFe_2$  dengan intensitas yang cukup kecil yaitu 15, 16 dan 16 pada sudut  $2\theta$  sebesar  $46,69^\circ$ ;  $51,00^\circ$  dan  $58,00^\circ$  pada bidang 222, 400 dan 420.



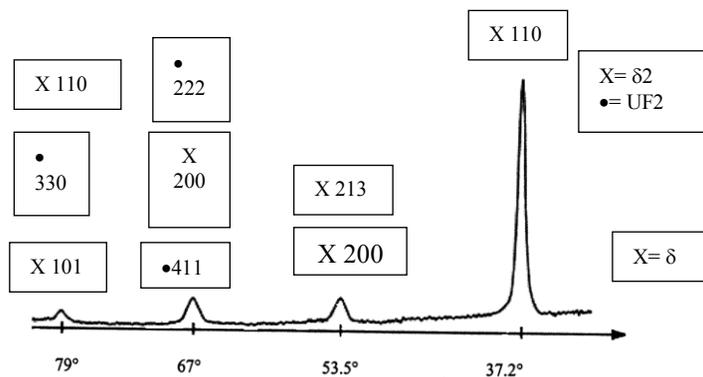
Gambar 6. Komposisi fase paduan U-7%Mo



Gambar 7. Komposisi fase paduan U-11%Mo

Sementara itu, hasil pengujian sampel paduan UMo kadar 11% Mo (Gambar 7), terlihat bahwa paduan UMo didominasi oleh fase  $\delta_2$ - $U_2Mo$  dan sejumlah kecil fase  $UFe_2$ . Fase  $\delta_2$ - $U_2Mo$  terdapat pada sudut  $2\theta$ :  $28,02^\circ$ ;  $37,02^\circ$ ;  $38,10^\circ$ ;  $53,60^\circ$  dan  $67,36^\circ$  pada bidang 101,

110, 203, 200 dan 213 dengan intensitas masing-masing sebesar 23, 100, 16, 26 dan 34,23 sedangkan fase  $UFe_2$  pada sudut  $2\theta$  sebesar  $77,88^\circ$ ;  $79,72^\circ$  dan  $91,75^\circ$  pada bidang 008, 220 dan 310 dengan intensitas masing-masing sebesar 24, 19 dan 21. Adanya unsur Fe dalam bentuk senyawa  $UFe_2$  kemungkinan berasal dari alat bubut / alat penumbuk waktu pembuatan serpihan atau alat penumbuk yang terbuat dari baja yang ikut terbawa pada saat membuat serpih untuk membuat serbuk. Fase utama yang terbentuk dari proses peleburan sama seperti yang dihasilkan oleh Vacelet et al. yang ditunjukkan pada Gambar 8<sup>[3]</sup>. Hal ini menunjukkan bahwa teknik pembuatan paduan sudah sesuai.



Gambar 8. Komposisi fase paduan U-7%Mo

## V. KESIMPULAN

1. Hasil peleburan campuran logam U dan Mo dengan komposisi masing-masing 7, 8, 9, 10 dan 11% Mo di dalam tungku busur listrik dengan 5 kali pengulangan berbentuk ingot UMo. Ingot bersifat ulet sehingga proses perubahan menjadi serbuk dengan cara penumbukan sangat sulit dan dihasilkan serbuk berbentuk pipih.
2. Kekerasan ingot UMo meningkat seiring kenaikan kadar Mo, namun untuk kadar 11% Mo terjadi penurunan. Penurunan kekerasan ingot berkadar 11% Mo kemungkinan disebabkan oleh ketidakhomogenan ingot UMo sehingga di tempat-tempat tertentu terdapat unsur Mo berlebihan sedangkan di tempat lain mengalami kekurangan unsur Mo, baik sebagai larutan padat atau fase kedua.
3. Hasil pemeriksaan mikrostruktur dan pengujian komposisi fase menggunakan difraksi sinar-X diperoleh bahwa pada paduan UMo dengan kadar 7% Mo didominasi oleh fase  $\alpha$ -U, sedangkan pada 11% Mo didominasi oleh fase  $\delta_2$ - $U_2Mo$ .
4. Data uji menunjukkan bahwa kualitas ingot UMo (hasil peleburan) cukup baik, akan tetapi proses pembuatan serbuk dengan penumbukan sangat sulit dan dihasilkan serbuk berbentuk pipih dan terkontaminasi unsur Fe, sehingga perlu dipilih metode pembuatan serbuk yang lain seperti atomisasi atau *hydride-dehydride*.

## VI. DAFTAR PUSTAKA

1. SAVORNIN, B., and FANJAS, Y.R., "CERCA Contribution to the RERTR Program Status of Development", Proceedings of the International Meeting on RERTR, Argonne, Illinois, 8-10 November 1982.
2. ANONYMOUS, Reactor Fuel Assemblies, RRR SAR, ANSTO.
3. VACELET, H., et al., "Irradiation of Full Size UMo Plates", 22<sup>nd</sup> RERTR, Budapest, 3-8 October 1999.
4. 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, 1-6 October 2000.
5. IVANOV, O.S., et al., "Phase Diagrams of Uranium Alloys", Amerind Publishing Co., 1983.
6. TRAVELLI, A., "Progress of the RERTR Program in 2001", 6<sup>th</sup> International Topical Meeting on Research Reactor Fuel Management, 17-20 March 2002.
7. KIM, C.K., et al., "Status of the Qualification Program for Atomized UMo Dispersion Rod Type Fuel in Korea", 6<sup>th</sup> International Topical Meeting on RRFM, Belgium, March 2002.
8. SUPARDJO, "Karakterisasi Paduan  $U_xSi_y$  pada Daerah Komposisi antara 6,62 s/d 7,63% Si", Tesis Magister, Program Pasca Sarjana, ITB, 1993.
9. CULITY, B.D., "Elements of X-Ray Diffraction", 2<sup>nd</sup> ed., Addison-Wesley, 1978.

## LAMPIRAN

### Perhitungan sudut $2\theta$ , Indeks Miller dan fase yang muncul

Untuk menentukan sudut  $2\theta$ , indeks Miller dan fase yang mungkin muncul digunakan rumus sebagai berikut<sup>[9]</sup>.

#### a. Fase $\alpha$ -U

Struktur kristal  $\alpha$ U adalah ortorombik, maka jarak antar bidang ( $d$ ) dapat dihitung sebagai berikut:

$$1/d^2 = h^2/a^2 + k^2/b^2 + l^2/c^2 \quad (1)$$

Setelah harga  $d$  diketahui, selanjutnya dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

$$\lambda = 2 d \sin \theta \quad (2)$$

atau

$$2 \sin \theta = \lambda/d$$

sehingga  $2\theta$  dapat dihitung. Harga  $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$  (target Cu)

#### b. Fase $\delta_2$ - $U_2$ Mo dan $UFe_2$

Dengan cara yang sama, sudut  $2\theta$  dan indeks Miller untuk fase  $\delta_2$ - $U_2$ Mo dan  $UFe_2$  dapat dihitung. Hasil perhitungan ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil perhitungan sudut  $2\theta$ , bidang/indeks Miller dan fase yang terdeteksi

No.	UMo 11%				UMo 7%			
	$2\theta$	hkl	I/Io	Fase	$2\theta$	hkl	I/Io	Fase
1	28,02	101	23	$\delta_2$	26,87	011	29	$\alpha$
	37,02	110	100		38,80	110	26	
	38,10	103	16		52,90	121	15	
	53,60	200	26		78,38	211	18	
	67,36	213	34		33,90	020	81	
2	77,88	008	24	UFe <sub>2</sub>				UFe <sub>2</sub>
	79,718	220	19					
	91,749	310	21					
	46,69	222	15		46,69	222	15	
	51,00	400	16		51,00	400	16	
	58,00	420	16	58,00	420	16		