

Urania

Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir

Beranda jurnal: <http://jurnal.batan.go.id/index.php/urania/>



KOMPOSISI, STRUKTUR DAN DENSITAS PADUAN U-7Mo-xSi

Supardjo¹, Agoeng Kadarjono¹, Jan Setiawan¹, Ganisa Kurniati Suryaman¹

¹Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir – BATAN

Kawasan PUSPIPTEK Serpong Gd. 65, Tangerang Selatan, Banten 15314

e-mail: suparjo@batan.go.id

(Naskah diterima: 18-02-2021, Naskah direvisi: 20-03-2021, Naskah disetujui: 28-06-2021)

ABSTRAK

KOMPOSISI, STRUKTUR DAN DENSITAS PADUAN U-7Mo-xSi. Struktural paduan U-7Mo-xSi ($x= 1, 2, \text{ dan } 3\%$) dipelajari dalam rangka mendapatkan paduan uranium baru yang cocok digunakan sebagai kandidat bahan bakar reaktor riset densitas uranium tinggi. Paduan U-7Mo-xSi dibuat dengan teknik peleburan menggunakan tungku busur listrik, dan pengujian meliputi analisis komposisi kimia, densitas, kekerasan dan struktural fasa yang terdapat di dalamnya. Data uji menunjukkan bahwa dengan kenaikan kadar Si di dalam paduan U-7Mo-xSi kadar U dan densitas menurun dan kekerasannya meningkat. Pola difraksi Sinar-X paduan U-7Mo-xSi dideteksi dari sudut difraksi 25° hingga 95° , teramati adanya fasa U- γ , U_3Si_2 , dan U_3Si_2Mo . Makin tinggi kadar Si, fasa U_3Si_2 yang terbentuk semakin banyak dan kekerasannya meningkat karena semakin banyak terbentuknya ikatan antara Si dan Si.

Kata kunci: Paduan U-7Mo-xSi, bahan bakar nuklir densitas tinggi, komposisi, struktur, densitas.

ABSTRACT

COMPOSITION, STRUCTURE AND DENSITY OF U-7Mo-xSi ALLOY. *The structure of U-7Mo-xSi (x = 1, 2, and 3%) alloy was studied to obtain a new uranium alloy suitable for use as a candidate for high-density uranium research reactor fuel. The U-7Mo-xSi alloy was made by melting technique using an arc furnace. The characterization of the alloy includes chemical composition, density, and structural phases to identify the phases contained in the alloy. The hardness test was also done. The density characterization results show that U content and density of the alloy decrease with increasing of Si content in the U-7Mo-xSi alloy. On the other hand, the hardness of the alloy increases with increasing of Si content. The X-ray diffraction pattern of U-7Mo-xSi alloy was observed from diffraction angle of 25 ° to 95 °. The results indicate the presence of U- γ , U₃Si₂, and U₃Si₂Mo phases. The higher the Si content, the more U₃Si₂ phase is formed and the more the hardness increases due to the formation of bonds between Si and Si.*

Keywords: *U-7Mo-xSi alloy, high density nuclear fuel, composition, structure, density.*

PENDAHULUAN

Uranium adalah merupakan material utama bahan bakar nuklir yang digunakan sebagai bahan bakar reaktor fisi. Semula reaktor fisi menggunakan logam uranium sebagai bahan bakar, namun karena uranium murni mudah teroksidasi dan selama digunakan sebagai bahan bakar *swelling*nya cukup besar maka untuk memperbaiki sifat tersebut selanjutnya dilakukan pengembangan ke dalam bentuk uranium oksida baik dalam bentuk UO_2 maupun U_3O_8 . Reaktor nuklir generasi selanjutnya penggunaan bahan bakar logam kembali menjadi pilihan karena menawarkan sifat yang menjanjikan peningkatan kinerja bahan bakar dalam hal keberlanjutan, keandalan, dan keselamatan. Untuk memenuhi agar bahan bakar memiliki kinerja yang lebih baik selama iradiasi dan siklus termal maka dikembangkan bahan bakar paduan uranium dengan pepadu, Nb, Mo atau Zr [1].

Upaya pengalihan penggunaan bahan bakar reaktor riset dari pengkayaan tinggi >90% ^{235}U menjadi <20% ^{235}U telah dilakukan sejak tahun 1970 an. Upaya ini tertuang dalam program *Reduced Enrichment Research and Test Reactor* (RERTR). Tujuan dari program ini adalah untuk menghindari penyalahgunaan uranium pengkayaan tinggi untuk tujuan non damai / senjata nuklir. Pada tahun 1970 an, bahan bakar uranium pengkayaan tinggi yang digunakan untuk reaktor riset adalah bahan bakar dispersi $UAlx/Al$. Bahan bakar ini memiliki densitas uranium maksimum sebesar 2,3 gU/cm^3 [2]. Pengalihan pengkayaan uranium di dalam bahan bakar berakibat terjadi penurunan jumlah uranium yang otomatis jumlah ^{235}U nya juga menurun sehingga kinerja reaktor juga turun. Agar reaktor dapat dioperasikan dengan kinerja seperti pada penggunaan uranium pengkayaan tinggi tanpa mengubah desain volume bahan bakarnya, maka dengan menggunakan uranium pengkayaan rendah membutuhkan densitas uraniumnya minimal 8 gU/cm^3 [2]. Untuk mempertahankan kinerja reaktor agar dapat beroperasi seperti ketika menggunakan uranium pengkayaan tinggi, maka dipilih paduan uranium yang mempunyai densitas tinggi.

Bahan bakar U_3Si_2/Al densitas uranium 4,8 gU/cm^3 merupakan pengembangan pertama yang dilakukan dengan uranium pengkayaan rendah. Bahan bakar U_3Si_2/Al menunjukkan unjuk kerja yang baik selama digunakan sebagai bahan bakar di dalam reaktor, namun densitas uranium tersebut belum sesuai yang diharapkan sebesar 8

gU/cm^3 . Untuk mendapatkan densitas uranium dalam U_3Si_2/Al mencapai >4,8 gU/cm^3 cukup sulit untuk dilakukan. Hal ini dikarenakan untuk densitas tinggi, bahan bakar U_3Si_2/Al sulit difabrikasi terutama untuk mempertahankan tebal kelongsong >0,25 mm. Hal lain yang menjadi kelemahan bahan bakar U_3Si_2/Al adalah olah ulang gagal produk dan bahan bakar pasca iradiasi sulit dilakukan. Oleh karena itu pengembangan bahan bakar lebih lanjut menggunakan paduan berbasis UMo.

Paduan berbasis UMo menjadi alternatif terpilih dalam pengembangan bahan bakar reaktor riset dengan uranium pengkayaan rendah karena memiliki densitas tinggi. Program di seluruh dunia mendorong pengembangan bahan bakar yang diperkaya dengan ^{235}U rendah untuk mengubah inti reaktor riset (reaktor uji material, sumber neutron, dll.) yang saat ini bekerja dengan bahan bakar U_3Si_2 atau $UAlx$ yang sangat diperkaya (hingga 93%). Untuk inti yang paling bertenaga, paduan UMo dengan kepadatan tinggi tampaknya menjadi satu-satunya bahan bahan bakar yang dapat dikonversi tanpa menurunkan kinerja reaktor. Unsur bahan bakar UMo untuk reaktor riset biasanya berupa batang atau pelat. Dalam konsep terakhir, bahan fisil dapat berupa monolitik atau terdispersi (partikel kecil dalam matriks Al). Dalam kedua kasus, itu kemudian ditekan di antara lembaran Al, digunakan sebagai kelongsong. Perilaku pelat bahan bakar UMo di bawah iradiasi saat ini tidak memuaskan karena pertumbuhan lapisan interaksi tebal pada antarmuka UMo / Al [3]-[5].

Molybdenum adalah elemen paduan yang disukai digunakan untuk menstabilkan fase uranium. Keuntungan utama bahan bakar uranium-molybdenum adalah stabilitas dimensinya, ketahanan korosi yang unggul, dan kekuatan suhu tinggi. Mo lebih disukai daripada Zr karena merupakan penstabil yang lebih kuat yang memberikan perilaku pembengkakan yang stabil [5]. Mo memiliki potensial reaksi yang lebih rendah dengan kelongsong (Fe) dibandingkan dengan Zr [6].

Bahan bakar dispersi UMo-Al yang telah diiradiasi menunjukkan adanya lapisan antara paduan UMo dan matriks Al. Lapisan hasil interaksi ini memiliki konduktivitas termal yang lebih rendah dibandingkan dengan matriks sehingga dapat menyebabkan kenaikan temperatur bahan bakar. Selain itu, densitas layer ini sangat rendah sehingga dengan adanya pertumbuhan layer ini dapat menyebabkan terjadinya *swelling*. Untuk

menstabilkan interaksi antara matriks dengan paduan UMo, maka ditambahkan unsur penstabil salah satunya adalah logam Si [3].

METODOLOGI

Pembuatan paduan U-7Mo-xSi (x=1, 2, dan 3%) dilakukan dengan teknik peleburan dalam tungku busur listrik (*arc melt*) bermedia gas argon. Percobaan menggunakan bahan baku uranium deplesi. Sebelum dilebur, dilakukan pencucian terlebih dahulu menggunakan HNO₃ pekat pada temperatur 70 °C selama beberapa detik untuk mengilangkan unsur logam pengotor. Selanjutnya logam U yang sudah bersih dari unsur pengotor dianalisis kadar U dan impuritasnya, demikian juga logam Mo dan Si sebagai pemadu dianalisis untuk mengetahui unsur logam penyusunnya. Metode titrimetri menggunakan alat titroprocessor dilakukan untuk mengetahui kadar uranium di dalam logam U, sedangkan kandungan unsur pengotor dianalisis dengan metode serapan atom menggunakan *Atomic Absorption Spektrofotometer* (AAS). Pelat logam Mo dianalisis menggunakan AAS, sedangkan logam Si diambil dari sertifikat pemasok *Fuchi Chemical Corporation Fine Trading Division Tokyo* 143 Japan dan berdasar sertifikat dari pabrik pembuatannya memiliki komposisi Si: 99,999%, Al: 1 ppm, Fe: 1 ppm, dan Mg: 1 ppm. Data analisis logam U, Mo dan Si digunakan sebagai dasar untuk menghitung komposisi berat masing-masing unsur logam dalam pembuatan paduan U-7Mo-1Si, U-7Mo-2Si, dan U-7Mo-3Si.

Masing-masing komposisi unsur logam U, Mo dan Si dilebur di dalam tungku busur listrik. Arus listrik yang digunakan pada saat peleburan sebesar 150 A, dengan media gas argon. Setiap paduan dilebur dengan

pengulangan sebanyak 5 kali sehingga diperoleh paduan U-7Mo-xSi yang homogen [3]. Ingot hasil peleburan selanjutnya dianalisis kandungan pengotor menggunakan *Atomic Absorption Spektrofotometer* (AAS), komposisi fasa yang terbentuk menggunakan Difraksi Sinar-X, densitas menggunakan metode *immerse* menggunakan larutan *carbon tetrachloride*, dan pengujian kekerasan menggunakan alat uji kekerasan mikro. Pola difraksi paduan U-7Mo diperoleh dari difraktometer Sinar-X dengan sumber Cu yang memiliki panjang gelombang 1,540 Å, dan dideteksi dari sudut difraksi 25° hingga 95°. Penentuan fasa, ukuran kistalit serta *microstrain*, dan analisis Rietveld dilakukan pada pola difraksi Sinar-X paduan U-7Mo yang diperoleh [5]. Penentuan fasa ditentukan menggunakan aplikasi *highscore plus* dari Panalytical yang dilengkapi dengan basis data *International Centre for Diffraction Data* (ICDD), *Inorganic Crystal Structure Database* (ICSD) dan *Crystallography Open Database* (COD). Ukuran kristalit dan *microstrain* ditentukan dengan metode Williamson-Hall. Penentuan parameter kisi, dan densitas teoritis dari paduan ditentukan dari aturan campuran dan analisis Rietveld.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Logam uranium deplesi, Mo dan Si masing-masing dianalisis menggunakan AAS untuk mengetahui kemurnian dan kandungan unsur-unsur pengotornya. Kemurnian bahan diperlukan dipakai sebagai dasar perhitungan pembuatan masing-masing paduan, sedangkan keberadaan unsur logam pengotor diperlukan sesuai dengan persyaratan bahan bakar. Hasil analisis ketiga logam tersebut ditunjukkan pada Tabel 1, dan Tabel 2 komposisi untuk peleburan.

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

Unsur pengotor	Kadar dalam sampel (ppm)				Keterangan
	Logam U	Pelet Mo	Logam Si (serifikat)	Serbuk Al	
Cd	ttd	1,68	-	ttd	ttd=<0,2
Fe	8.25	35,07	1,0	288,00	
Co	ttd	11,30	-	ttd	ttd=<0,5
Mn	ttd	3,14	-	220,00	ttd=<0,2
Mg	2.49	0,27	1,0	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
Al	ttd	9475,23	1,0	ttd	ttd=<5,0
Si	ttd	ttd	99,999	700,00	ttd=<15,0
Kadar U, %			99,94		

Catatan: ttd = tidak terdeteksi

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

Logam U murni hasil pickling, 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

Perbedaan antara sebelum dan setelah peleburan tidak jauh berbeda. Pengurangan berat setelah proses peleburan sangat dimungkinkan terjadi. Logam yang dicampurkan kemungkinan selama proses peleburan dengan *arc melting* ada sebagian yang tidak menyatu dan tetap terpisah. Namun dilihat dari besaran selisih baik pengurangan maupun penambahan besar kesalahan absolutnya tidak mencapai 0,001%. Sedangkan untuk penambahan berat sangat dimungkinkan terjadi oksidasi pada permukaan selama penyimpanan hingga akan ditimbang. Meskipun sudah dilakukan proses *pickling* sebelum dilakukan proses penimbangan.

Ingot U-7Mo-xSi hasil peleburan diuji kekerasannya menggunakan metode vickers. Unsur Si dalam paduan U-7Mo dapat berpengaruh terhadap kekerasannya. Hasil uji kekerasan mikro ingot U-7Mo-xSi ditunjukkan pada Tabel 3. Kekerasan paduan semakin tinggi seiring dengan meningkatkan kandungan unsur Si. Kecenderungan peningkatan kekerasan ini seperti yg terjadi pada penambahan unsur Ti pada paduan U-7Mo. Kekerasan paduan U-7Mo-xTi cenderung meningkat dengan pertambahan unsur Ti dalam paduan [7]. Nilai kekerasan untuk ingot U-7Mo-xSi dengan kadar Si: 0; 1; 2 dan 3% berturut - turut adalah 240,4; 328,6;

333,6 dan 416,6 HV. Bila dibandingkan dengan penambahan unsur Ti pada paduan U-7Mo, dengan persentase tertinggi (3%) penambahan unsur Si memiliki nilai kekerasan yang lebih tinggi [7]. Terbentuknya larutan padat Mo dan Si serta adanya efek penghalusan butir oleh unsur Si meningkatkan kekerasan paduan U-7Mo-xSi. Dalam larutan padat terjadi kecenderungan pergerakan atom Mo dan Si ke dalam kisi kristal α -U yang mengakibatkan distorsi parameter kisi sehingga menimbulkan medan tegangan disekitar atom yang larut. Kondisi seperti ini berperan menghambat pergerakan dislokasi. Paduan U-Mo-xSi ini juga berpotensi menghasilkan fasa kedua yaitu Mo₂U [8]. Fasa kedua tersebut berkontribusi pula untuk menghambat pergerakan dislokasi. Ukuran butir kecil memiliki banyak batas butir dan batas butir tersebut menjadi penghambat dislokasi sehingga bahan menjadi lebih kuat. Batas butir bertindak sebagai penghalang dislokasi slip (*slip dislocation*) yang menyebabkan dislokasi menumpuk pada bidang slip (*slip plane*) dibelakang batas butir. Dislokasi yang mencoba melewati dari butir yang satu ke butir yang berdekatan mengalami perubahan arah gerakan dan menyebabkan misorientasi kristal (*crystallographic misorientation*) [7].

Tabel 3. Kadar U, densitas dan kekerasan paduan U-7Mo-xSi hasil proses peleburan [9].

Komposisi paduan U-7Mo-xSi	Kadar U, %	Densitas, g/cm ³		Kekerasan, VHN
		<i>Immerse</i>	Aturan campuran	
U-7Mo	93,26	16,34	18,47	240,4
U-7Mo-1Si	92,07	15,90	18,31	328,6
U-7Mo-2Si	91,14	15,87	18,14	333,6
U-7Mo-3Si	90,21	15,78	17,98	416,6

Ingot paduan U-7Mo dan U-7Mo-xSi hasil proses peleburan dilakukan pengujian kekerasan menggunakan metode vickers dan densitas menggunakan metode *immerse*. Hasil uji yang ditampilkan pada Tabel 3, terlihat bahwa makin tinggi kadar Si densitasnya makin kecil sedangkan kekerasannya meningkat. Penurunan

densitas dapat dijelaskan bahwa dengan kenaikan kadar Si, jumlah U-7Mo menurun yang dapat dilihat dari penurunan kadar U di dalam paduan. Perhitungan densitas dengan aturan campuran menggunakan data dentistas U-7Mo dari metode *immerse* dengan densitas U sebesar 19,07 g/cm³ [10], densitas Mo sebesar 10,22 g/cm³ [10] dan Si sebesar

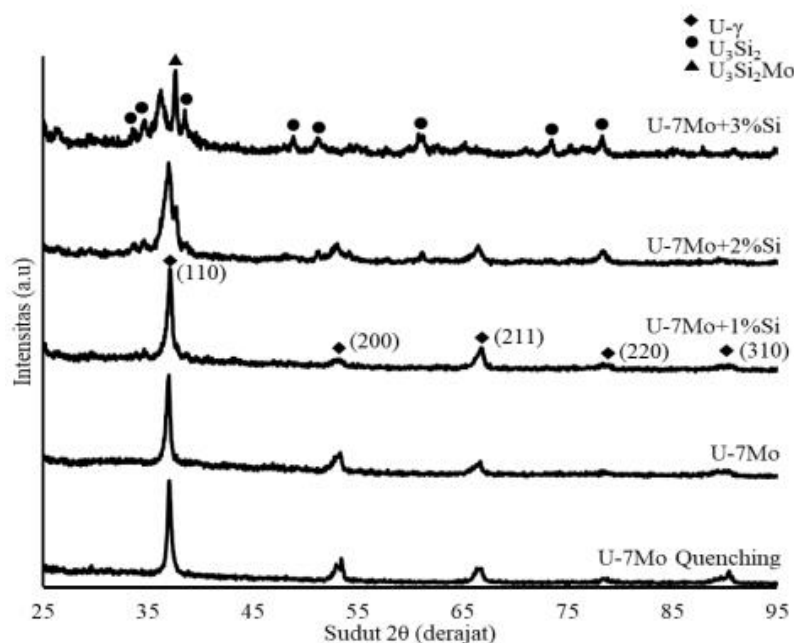
2,33 g/cm³ [10]. Terlihat kecenderungan penurunan densitas yang serupa. Namun densitas yang diperoleh dari aturan campuran sedikit lebih tinggi. Pendekatan aturan campuran juga diberikan dalam [11] dengan persamaan 1.

$$\rho = (0,05336 + 0,000445 X_{Mo})^{-1} \quad (1)$$

dengan ρ adalah densitas paduan U-Mo dalam g/cm³ dan X_{Mo} adalah fraksi berat Mo dalam persen berat. Namun, persamaan

ini diperuntukan fraksi Mo antara 5.5 hingga 16,2 %. Untuk paduan U-Mo dengan fraksi berat Mo sebesar 2.94 %, bila nilai ini dimasukkan ke dalam Persamaan 1 akan diperoleh nilai densitas paduan U-7Mo sebesar 18.74 g/cm³. Nilai ini lebih tinggi dari perhitungan aturan campuran yang menggunakan densitas dari unsur murninya.

Pola difraksi Sinar-X paduan U-7Mo dan U-7Mo-xSi yang dideteksi dari sudut difraksi 25° hingga 95° ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Pola difraksi Sinar-X paduan U-7Mo dan U-7Mo-xSi.

Dari Gambar 1, terlihat pola difraksi Sinar-X paduan U-7Mo *quenching*, tanpa *quenching*, dan penambahan unsur Si, sebesar 1%, 2% dan 3%. Proses penentuan fasa menggunakan aplikasi *Highscore Plus* dilakukan dengan memberikan pembatasan unsur kimia dalam proses pencarian fasanya. Unsur kimia yang ditentukan sesuai dengan unsur yang digunakan dalam proses pemadu, yaitu U, Mo, dan Si. Terlihat pada Gambar 1, fasa dalam paduan U-7Mo, didominasi oleh U- γ yang sesuai dengan kode referensi 98-018-1305, fasa ini mempunyai sistem kristal kubus. Paduan U-7Mo *Quenching* serupa dengan paduan U-7Mo yang seluruhnya didominasi oleh U- γ . Seiring peningkatan unsur pemadu Si, sangat dimungkinkan dalam paduan akan terjadi unsur Si berlebih selama proses pemaduan sehingga membuat kemunculan fasa selain fasa U- γ . Pada paduan U-7Mo-1%Si dan U-7Mo-2%Si,

terlihat kemunculan fasa U₃Si₂ yang sesuai dengan kode referensi 01-075-1941. Namun rasio sinyal terhadap derau fasa U₃Si₂ ini kurang baik untuk dianalisis. Pada paduan U-7Mo-3%Si selain fasa U- γ dan fasa U₃Si₂ terlihat juga fasa U₃Si₂Mo yang sesuai dengan kode referensi 00-051-0999 [12]. Pada paduan ini rasio sinyal terhadap derau untuk setiap fasanya lebih baik dan cukup untuk dianalisis. Fasa U₃Si₂Mo dalam Ugajin (1998) tidak diberikan informasi yang cukup untuk dilakukan analisis Rietveld. Informasi yang disampaikan hanya berupa struktur kristal kubik sederhana yang memiliki parameter kisi $a = 10.69 \pm 0.01 \text{ \AA}$, tetapi tidak menyertakan informasi grup ruang [12].

Ukuran kristalit dan *microstrain* pada paduan U-7Mo yang diperoleh melalui analisis profil pola difraksi menggunakan metode Williamson-Hall disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil ukuran kristalit dan *microstrain* dari metode Williamson-Hall

No	Paduan	Ukuran kristalit (nm)	<i>Microstrain</i>
1	U-7Mo Quenching	52,50	0,006656
2	U-7Mo	12,69	0,014664
3	U-7Mo-1%Si	21,15	0,005976
4	U-7Mo-2%Si	20,51	0,001649
5	U-7Mo-3%Si	128,66	0,001078

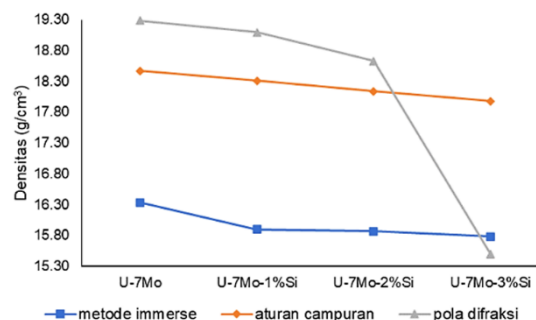
Dari Tabel 4, terlihat ukuran kristalit pada U-7Mo lebih kecil dari paduan yang lain, namun besaran *microstrain* pada paduan ini merupakan yang terbesar. Terlihat adanya korelasi antara *microstrain* pada Tabel 4 dengan kekerasan paduan pada Tabel 3,

dimana besarnya peningkatan kekerasan proposional dengan nilai *microstrain* [13]. Hasil analisis struktur pada pola difraksi menggunakan metode Rietveld dengan menggunakan aplikasi GSAS disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil analisis parameter kisi dan densitas teoritis fasa dalam paduan U-7Mo

No	Paduan	Fasa	Fraksi berat (%)	Struktur kristal	Parameter kisi (Å)	Densitas teoritis (g/cm ³)
1	U-7Mo Quenching	U- γ	100,00	Kubik	a = 3,4475	19,29
2	U-7Mo	U- γ	100,00	Kubik	a = 3,4479	19,29
3	U-7Mo-1%Si	U- γ	97,07	Kubik	a = 3,4471	19,30
		U ₃ Si ₂	2,93	Tetragonal	a = b = 7,3476 c = 3,8234	12,42
4	U-7Mo-2%Si	U- γ	93,39	Kubik	a = 3,4572	19,13
		U ₃ Si ₂	6,61	Tetragonal	a = b = 7,4964 c = 3,9605	11,49
5	U-7Mo-3%Si	U- γ	51,00	Kubik	a = 3,4572	19,10
		U ₃ Si ₂	17,98	Tetragonal	a = b = 7,8725 c = 3,4595	11,63
		U ₃ Si ₂ Mo	31,02	Kubik	a = 10,7200	11,80[1]

Analisis Rietveld dilakukan pada pola difraksi paduan U-7Mo-xSi yang diperoleh. Sebagai model fasa U₃Si₂Mo untuk analisis berdasarkan pendekatan struktur kristal yang diberikan oleh Ugajin (1998) [12], kami gunakan model grup ruang P m -3 m. Hasil analisis Rietveld dengan model tersebut, diperoleh nilai *chi-square* sebesar 3,855, dengan Rp sebesar 0,2318 dan wRp sebesar 0,1842. Secara keseluruhan, komparasi densitas dari pengukuran menggunakan metode *immerse*, perhitungan menggunakan aturan campuran dan perhitungan dari densitas yang diperoleh dari pola difraksi disampaikan pada Gambar 2. Pembentukan fasa yang diperoleh dalam [14] untuk U-Mo antara 0,82 hingga 2,08% diperoleh fasa α -U, yang pembentukannya akan terjadi apabila dilakukan pendinginan cepat. Pada variasi Mo sebesar 4,29% diperoleh fasa α' -U, serta diperoleh γ -U dengan parameter kisi a = 3.38 Å pada variasi Mo sebesar 17%.



Gambar 2. Densitas U-7Mo-xSi.

Nilai densitas teoritis dari pola difraksi terlihat lebih besar dibandingkan dengan nilai densitas yang diperoleh dari pengukuran metode *immerse* maupun dari aturan campuran. Hal tersebut sangat dimungkinkan dengan adanya nanoporous yang terbentuk dalam paduan saat proses sintesis material. Selain itu metode yang digunakan untuk mengukur densitas menggunakan larutan CCl₄ yang tentunya dengan ukuran partikel

yang relatif besar dan tegangan permukaan yang lebih besar tidak mampu masuk kedalam pori berukuran nano pada paduan. Selisih terbesar terjadi pada paduan U-7Mo-1%Si dimana antara densitas pengukuran dengan densitas dari pola difraksi yang diperoleh dengan persentase sebesar 17%. Pada paduan U-7Mo-3%Si, densitas dari pola difraksi paduan diperoleh sebesar 15,49 g/cm³ yang tidak berbeda jauh dengan densitas pengukuran. Selisih densitas untuk paduan ini diperoleh persentase sebesar 2%. Densitas yang diperoleh baik dari perhitungan aturan campuran dan analisis pola difraksi memiliki nilai yang lebih rendah bila dibandingkan dengan beberapa hasil densitas dalam [15] dan [11].

SIMPULAN

Paduan U-7Mo memiliki densitas 16,336 g/cm³ dan kekerasan 240,4 VHN. Perbedaan kandungan unsur Si di dalam paduan U-7Mo-xSi berpengaruh terhadap nilai densitas, kekerasan dan fasa yang terbentuk. Peningkatan kadar Si di dalam paduan membuat densitasnya menurun dengan meningkatkan kekerasan yang disebabkan adanya peningkatan fasa U₃Si₂ yang memiliki kekerasan yang lebih tinggi dari fasa U-γ. Pada paduan dengan kandungan 3%Si, diperoleh pengukuran densitas sebesar 15,78 g/cm³, yang nilainya masih lebih tinggi dari densitas teoritis yang diperoleh dari pola difraksinya yang bernilai sebesar 15,49 g/cm³. Dari pola difraksi menunjukkan adanya pembentukan fasa U₃Si₂ yang diperoleh nilai densitas berkisar antara 11 hingga 12 g/cm³. Besaran densitas pada rentang ini menunjukkan peluang yang sangat potensial untuk digunakan sebagai bahan bakar dengan meningkatkan densitas uraniumnya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan selesainya penelitian dan penulisan makalah ini ucapan terima kasih disampaikan kepada PTBBN yang telah membiayai dengan DIPA, dan kepada bapak Yatno Dwi Agus Susanto, bapak Isfandi, bapak Slamet Pribadi serta seluruh pegawai atas bantuannya.

DAFTAR PUSTAKA (REFERENCES)

- [1] A. M. Adamska, R. Springell, and T. B. Scott, "Characterization of poly- and single-crystal uranium-molybdenum alloy thin films," *Thin Solid Films* 550, pp. 319 – 325, 2014.
- [2] S. Van den Berghe, A. Leenaers, E. Koonen, and L. Sannen, "From high to

low enriched uranium fuel in research reactors," *Advances in Science and Technology*, vol. 73, pp. 78 – 90, Trans Tech Publications Ltd, 2010.

- [3] Supardjo, H. Suwarno dan A. Kadarjono, "Karakterisasi Paduan U-7%Mo dan U-7%Mo-x%Si (x = 1, 2, dan 3%) Hasil Proses Peleburan Dalam Tungku Busur Listrik," *Urania Jurnal Daur Bahan Bakar Nuklir*, vol. 15, no. 4, hal. 171 – 232, 2009.
- [4] J. Allenou, O. Tougait, M. Pasturel, X. Iltis, F. Charollais, M. C. Anselmet, and P. Lemoine, "Interdiffusion behaviors in doped molybdenum uranium and aluminum or aluminum silicon dispersion fuels: Effects of the microstructure," *Journal of Nuclear Materials*, vol. 416, no. 1 – 2, pp. 205 – 210, 2011.
- [5] D. W. Brown, M. A. Okuniewski, J. D. Almer, L. Balogh, B. Clausen, J. S. Okasinski, and B. H. Rabin, "High energy X-ray diffraction measurement of residual stresses in a monolithic aluminum clad uranium-10 wt% molybdenum fuel plate assembly," *Journal of Nuclear Materials*, vol. 441, no. 1-3, pp. 252-261, 2013.
- [6] T. R. G. Kutty, S. Dash, J. Banerjee, S. Kaity, A. Kumar, and C. B. Basak, "Thermophysical properties of U₂Mo intermetallic," *Journal of Nuclear Materials*, vol. 420, no. 1 – 3, pp. 193 – 197, 2012.
- [7] M. K. Ajiriyanto, Supardjo, Boybul, and A. Kadarjono, "Pengaruh unsur Ti pada paduan U-7Mo-xTi terhadap struktur mikro dan kekerasan ingot serta morfologi serbuk hasil hidriding-dehidriding," *Urania Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir*, vol. 19, no. 3, hal. 119 – 174, 2015.
- [8] E. J. Kautz, A. Devaraj, L. Kovarik, C. A. Lavender, and V. V. Joshi, "Effect of silicon in U-10Mo alloy," PNNL-26790, Pacific Northwest National Lab. (PNNL), Richland, United States, 2017.
- [9] Supardjo, A. Kadarjono., Isfandi, Y. D. A. Susanto., S. Permana, dan Guswardani, "Percobaan pembuatan pelat elemen bakar U-7Mo-xSi/Al dalam ukuran mini," *Urania Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir*, vol. 25, no. 3, hal. 141 – 152, 2019.
- [10] W. M. Haynes, *CRC handbook of chemistry and physics*, CRC press, 2014.

- [11] J. L. Snelgrove, "Supplemental information about uranium–molybdenum alloy properties, including discrepancies in the literature appendix," (IAEA-TECDOC-1923), International Atomic Energy Agency (IAEA), 2020.
- [12] M. Ugajin, *et al*, "Uranium molybdenum silicide U₃MoSi₂ and phase equilibria in the U–Mo–Si system." *Journal of Nuclear Materials*, vol. 257, no. 2, pp. 145 – 151, 1998.
- [13] S. Mahadevan, R. Manojkumar, T. Jayakumar, C. R. Das, and B. P. C. Rao, "Precipitation-induced changes in microstrain and its relation with hardness and tempering parameter in 17-4 PH stainless steel," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 47, pp. 3109 – 3118, 2016.
- [14] S. Chakraborty, G. Choudhuri, J. Banerjee, R. Agarwal, K. B. Khan, and A. Kumar, "Micro-structural study and Rietveld analysis of fast reactor fuels: U–Mo fuels," *Journal of Nuclear Materials*, vol. 467, pp. 618 – 627, 2015.
- [15] A. Leenaers, S. Van den Berghe, and C. Detavernier, "Surface engineering of low enriched uranium–molybdenum," *Journal of Nuclear Materials*, vol. 440, no. 1-3, pp. 220-228, 2013.

HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN