

PEMBUATAN INGOT PADUAN U-7Mo-xZr DENGAN MENGUNAKAN TEKNIK PELEBURAN DAN KARAKTERISASINYA

Supardjo⁽¹⁾, Agoeng K⁽¹⁾, Boybul⁽¹⁾

1. Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir (PTBN)-BATAN
Kawasan Puspiptek Serpong, Tangerang Selatan 15314

E-Mail: suparjo@batan.go.id.

(Naskah diterima: 05-09-2011, disetujui: 29-09-2011)

ABSTRAK

PEMBUATAN INGOT PADUAN U-7Mo-xZr DENGAN MENGUNAKAN TEKNIK PELEBURAN DAN KARAKTERISASINYA. Percobaan pembuatan ingot paduan U-7Mo-xZr dilakukan dalam rangka pengembangan material baru untuk bahan bakar reaktor riset dengan densitas uranium tinggi. Ingot paduan U-7Mo-xZr dibuat dengan menggunakan teknik peleburan dalam tungku busur listrik dengan arus 150 A dan bermedia gas argon. Peleburan dilakukan dengan 5 kali pengulangan dan ingot paduan U-7Mo-xZr hasil peleburan dikenai pengujian/analisis meliputi: analisis kadar uranium, berat jenis, strukturmikro, kekerasan, sifat termal dan komposisi fasa. Pengamatan secara visual terhadap ingot paduan U-7Mo-xZr hasil peleburan tidak terlihat adanya retak, pori atau lapisan oksida dipermukaan dan dari pemeriksaan strukturmikro terlihat cukup homogen. Kenaikan kadar Zr dalam paduan U-7Mo-xZr menyebabkan kekerasan meningkat sedangkan densitasnya menurun. Data pengujian kekerasan paduan U-7Mo, U-7Mo-1Zr, U-7Mo-2Zr dan U-7Mo-Zr berturut-turut adalah 240,4; 294,6; 314,6; dan 333,2 VHN, sedangkan densitasnya 17,8628; 17,3517; 17,0335; dan 16,8721 g/cm³. Data uji dengan menggunakan DTA menunjukkan bahwa terjadi reaksi endotermik dengan entalpi 3,2461 cal/g mulai pada temperatur 1.180,76°C dan puncaknya pada temperatur 1.205,15°C, sedangkan pola difraksi sinar-X menunjukkan bahwa ingot hasil peleburan dalam fasa γ . Dari hasil uji paduan U-7Mo-xZr menunjukkan bahwa paduan tersebut cocok untuk dinominasikan sebagai bahan bakar reaktor riset dimasa mendatang.

Kata kunci: Proses peleburan, paduan U-7Mo-xZr, bahan bakar dispersi, densitas uranium tinggi.

ABSTRACT

THE MANUFACTURE OF U-7Mo-xZr ALLOYS WITH USING SMELTING TECHNICAL AND CHARACTERIZATION. The experiment of U-7Mo-xZr alloys manufacture done in order to develop new materials for research reactor fuel with a high uranium density. The U-7Mo-xZr alloy made by smelting technique in electric arc furnace with a current of 150 A and argon gas as mediated. Melting performed with 5 time repetitions and U-7Mo-xZr alloy produced are testing / analysis include: analysis of uranium content, specific gravity, microstructure, hardness, thermal properties and phase composition. Visual observation of the U-7Mo-xZr alloys remelting produced no visible cracks, pores or oxide layer on the surface and from it's microstructure looks quite homogeneous.

Increased of Zr content in the U-7Mo-xZr alloy cause hardness increased while the density decreases. Hardness testing data of U-7Mo, U-7Mo-1Zr, U-7Mo-2Zr and U-7Mo-3Zr alloys consecutive 240.4: 294.6: 314.6, and 333.2 VHN, while the density of 17.8628; 17.3517; 17.0335, and 16.8721 g/cm³. The data result with the DTA showed that the reaction occurs with enthalpy indotermik 3.2461 cal/g starts at a temperature of 1180.76°C and a peak at a temperature of 1205.15°C, whereas the X-ray diffraction pattern showed that the ingot remelting in γ phase. From the test results of U-7Mo-xZr alloy showed that the alloy is suitable to be nominated as a research reactor fuel in future.

Key words: The process of smelting, U-7Mo-xZr alloy, dispersion fuel, high uranium density

PENDAHULUAN

Bahan bakar nuklir merupakan komponen utama beroperasinya reaktor nuklir, baik reaktor riset maupun reaktor daya. Reaktor riset pada awalnya menggunakan bahan bakar dengan uranium pengayaan tinggi (>90% ²³⁵U), tetapi dengan adanya keawatiran disalahgunakan untuk tujuan non damai oleh orang-orang yang tidak bertanggung jawab, maka seluruh reaktor riset di dunia dianjurkan untuk mengganti bahan bakar dengan uranium pengayaan rendah (<20% ²³⁵U). Penggantian penggunaan bahan bakar dari uranium berpengayaan tinggi kepengayaan rendah (pada dimensi bahan bakar tetap) terdapat konsekuensi penurunan jumlah ²³⁵U menjadi sekitar 1/5 nya sehingga otomatis akan menurunkan waktu tinggal di dalam reaktor. Untuk mempertahankan waktu tinggal di dalam reaktor minimal sama dengan penggunaan uranium berpengayaan tinggi, maka alternatif yang memungkinkan adalah menggunakan bahan bakar baru yang memiliki berat jenis tinggi sehingga jumlah ²³⁵U dapat ditingkatkan.

Bahan bakar U₃Si₂/Al densitas uranium 4,8gU/cm³ dengan uranium berpengayaan rendah merupakan hasil pengembangan para peneliti yang tergabung dalam program RERTR dan telah mendapatkan lisensi dari *US Nuclear Regulatory Commission* pada tahun 1988^[1]. Stabilitas iradiasi bahan bakar U₃Si₂/Al sangat baik, tetapi dengan densitas uranium

optimum hanya 4,8gU/cm³ sehingga belum dapat mengkompensasi penurunan pengayaan uranium. Berdasarkan pertimbangan tersebut, maka diperlukan material baru yang memiliki berat jenis tinggi, stabil selama iradiasi, mudah difabrikasi dan olah ulang bahan bakar pasca iradiasi. Salah satu material yang sesuai sebagai kandidat bahan bakar tersebut adalah paduan uranium berbasis U-Mo.

Paduan UMo memiliki berat jenis sekitar 16,4 g/cm³ (tergantung kadar Mo), tahan terhadap korosi, tampang lintang serapan neutron rendah, tetapi paduan bersifat ulet (*ductile*) sehingga sulit dibuat serbuk secara mekanik (*grinding mill/ball mill*). Berat jenis tersebut lebih tinggi dibandingkan dengan berat jenis paduan uranium/uranium oksida yang telah digunakan sebagai bahan bakar reaktor riset seperti U₃Si₂, U₃O₈, dan UAl_x yang masing-masing sebesar 12,2, 8,4, dan 6,7 g/cm³. Penggunaan U-Mo sebagai bahan bakar tipe dispersi menunjukkan, densitas uranium di dalam *meat* pelat elemen bakar dapat ditingkatkan menjadi > 8,0 gU/cm³ dan sesuai dengan yang diperlukan dalam bahan bakar reaktor riset terkait penggunaan uranium berpengayaan rendah. Kelebihan lain paduan UMo sebagai bahan bakar adalah proses olah ulang lebih mudah dibandingkan bahan bakar U₃Si₂/Al^[3,4].

Logam uranium murni pada prinsipnya merupakan bahan bakar yang memiliki berat jenis tinggi, tetapi isotropic fasa γ U selama iradiasi hanya stabil pada

temperatur tinggi, sementara pada temperatur rendah struktur fasa α U berpotensi *swelling*. Perubahan fasa γ ke α (melalui fasa β) tidak dapat ditahan dengan *quenching* fasa γ U murni pada temperatur tinggi, tetapi pada rentang temperatur diatas dimana fasa α , β , dan γ menjadi stabil sehingga sebagai alternatifnya memerlukan penambahan bahan pemadu^[6].

Molybdenum memiliki derajat kelarutan padat γ U yang tinggi. Jika pendinginan lambat atau paduan mengandung < 7%Mo, kesetimbangan paduan U(Mo) dibawah 560 °C berupa campuran fasa α U dan γ (U₂Mo), sementara larutan padat γ -U/Mo terbentuk pada temperatur tinggi. Walaupun fasa γ U paduan UMo memiliki unjuk kerja yang baik selama iradiasi, tetapi sebagai bahan bakar dispersi U-Mo/Al terlihat bahwa selama proses iradiasi terbentuk pori yang besar yang menyebabkan lapisan/*layer* hasil interaksi antara partikel bahan bakar U-Mo dan matriks Al menjadi tidak stabil. Pertumbuhan *layer* hasil interaksi menyebabkan temperatur bahan bakar naik karena konduktivitas thermal lebih rendah dari pada matriks. Selain itu *layer* hasil interaksi memiliki densitas lebih rendah daripada densitas rerata reaktan, sehingga pertumbuhan *layer* menyebabkan terjadinya *swelling meat* bahan bakar yang cukup signifikan^[7]. Untuk menstabilkan dapat dilakukan dengan beberapa cara diantaranya menambahkan unsur logam ke dalam paduan UMo (Si, Ti, Zr, dll) atau menggunakan bahan matriks yang berbeda seperti serbuk Mg atau campuran Al dan Si^[8].

Pada penelitian ini dilakukan pembuatan paduan U-Mo-Zr dan karakterisasinya. Paduan U-7Mo-xZr (x=1; 2; dan 3 %) dibuat dengan teknik peleburan dalam tungku busur listrik bermedia gas argon. Ingot paduan U-7Mo-xZr hasil peleburan dikenai pengujian/analisis untuk mengetahui sifat paduan tersebut. Data pengujian/analisis digunakan sebagai dasar

pertimbangan kesesuaiannya dengan persyaratan bahan bakar dan juga sebagai dasar pengerjaan/penelitian lebih lanjut.

TATA KERJA

Penelitian menggunakan bahan baku U deplesi dan bahan pemadu logam Mo dan Zr. Kadar U dianalisis dengan metode titrimetri menggunakan alat titroprosesor, sedangkan analisis unsur logam pengotor dalam logam U dan unsur logam dalam Mo/Zr menggunakan AAS (*Atomik Absorption Spektrofotometer*). Hasil analisis digunakan sebagai dasar untuk menghitung komposisi berat logam U, Mo dan Zr pada pembuatan ingot paduan U-7Mo-xZr. Campuran U dan Mo dengan komposisi U-7Mo (93% berat U dan 7% berat Mo) dibuat sebanyak 3 buah, kemudian pada masing-masing campuran ditambahkan unsur logam Zr berturut-turut 1%, 2%, dan 3%. Selanjutnya masing-masing campuran dilebur dalam tungku busur listrik bermedia gas argon dengan arus 150A. Peleburan dilakukan dengan lima kali pengulangan dan setiap peleburan selama 2 menit. Ingot hasil peleburan diamati secara visual dan dikenai pengujian/analisis terhadap: berat jenis *menggunakan alat Ultrapyc 1200e Version 4.00*, strukturmikro menggunakan teknik metalografi, kekerasan dengan metoda Vickers, dan komposisi fasa dengan XRD. Data hasil pengujian dievaluasi kesesuaiannya dengan persyaratan bahan bakar.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil analisis logam U, Mo dan Zr ditampilkan pada Tabel 1. Kadar unsur logam utama U, Mo dan Zr digunakan sebagai data masukan untuk perhitungan komposisi pembuatan ingot paduan U-7Mo-xZr, sedangkan unsur logam pengotor menjadi pertimbangan berkaitan dengan persyaratan serbuk bahan bakar. Hasil

analisis menunjukkan bahwa logam U mempunyai kemurnian 99,95 %, dengan impuritas unsur logam Fe = 8,25 ppm (max. 1000 ppm) dan Mg = 2,49 ppm. Berdasar data analisis pada Tabel 1, komposisi

masing-masing unsur logam untuk pembuatan paduan U-7Mo-xZr (x=1, 2, dan 3%) dapat dihitung seperti ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 1. Data analisis logam U, Mo dan Zr

Unsur Logam	Konsentrasi Unsur Dalam Logam		
	Logam U	Logam Mo	Logam Zr
U	99,95 %	-	-
Mo	-	99,95 %	-
Zr	-	-	99,99%
Cd	ttd	1,68 ppm	ttd
Fe	8,25 ppm	35,07 ppm	175,67 ppm
Co	ttd	11,3 ppm	5,14 ppm
Mn	ttd	3,14 ppm	ttd
Mg	2,49 ppm	0,27 ppm	3,25 ppm
Cu	ttd	7,25	14,10 ppm
Cr	ttd	ttd	159,74 ppm
Ni	ttd	60,94 ppm	107 ppm
Al	ttd	9475,23 ppm	334,60 ppm
Si	ttd	ttd	2860,87 ppm

Catatan: ttd = tidak terdeteksi

Tabel.2. Data berat komposisi unsur logam pada pembuatan paduan

Paduan	Berat penimbangan, g		
	U	Mo	Zr
U-7Mo-1Zr	15,1163	1,1371	0,1643
U-7Mo-2Zr	14,9653	1,1241	0,3299
U-7Mo-3Zr	14,9937	1,1282	0,4987

Pengamatan secara visual terhadap ingot paduan U-7Mo-xZr hasil peleburan (dengan komposisi unsur logam pada Tabel 1) yang ditunjukkan pada contoh Gambar 1., terlihat bahwa ingot sangat masif dan tidak terdapat pori. Ingot paduan U-7Mo-xZr sangat ulet sehingga sulit dibuat serbuk secara mekanik (*ball-mill* dan *grinding-mill*). Oleh karena itu mengingat bahan bakar dispersi dibuat dengan metalurgi serbuk, maka metode pembuatan serbuk yang tepat menjadi sangat penting.



Gambar 1. Ingot paduan U-7Mo-1Zr hasil peleburan

Kadar U di dalam ingot paduan U-7Mo-xZr dianalisis dengan metode Titrimetri dan diperoleh hasil seperti ditampilkan pada Tabel 3. Bila dibandingkan dengan kadar U pada preparasi pembuatannya, kadar U pada

paduan U-7Mo-1Zr, U-7Mo-2Zr, dan U-7Mo-3Zr berturut-turut adalah: 92,07%, 91,14% dan 90,21%, sedangkan dari hasil analisis 92.30, 91.90, dan 91.23%. Perbedaan kadar U hasil analisis dengan kadar U pada preparasi awal kemungkinan disebabkan homogenitas paduan kurang sempurna, sehingga dengan perbedaan posisi

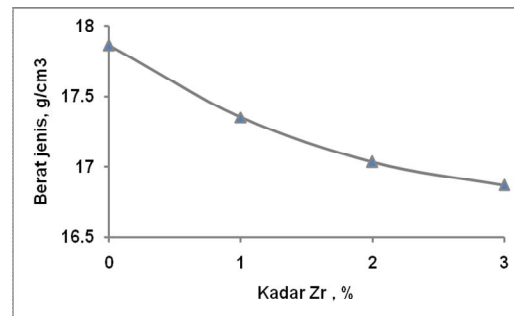
pengambilan sampel untuk analisis diperoleh hasil yang berbeda. Untuk penyempurnaan homogenitas ingot paduan U-7Mo-xZr hasil peleburan maka perlu dilakukan pemanasan pada temperatur sedikit dibawah temperatur *eutektoid* ($\pm 550^{\circ}\text{C}$) selama beberapa jam.

Tabel 3. Kadar U dalam ingot paduan U-7Mo-xZr

Sampel	Berat(g)	Volume, cm^3	g/L	Hasil analisis, %	Faktor koreksi
U-7Mo-1Zr	0.1572	25	6.2880	97.02	92.30
U-7Mo-2Zr	0.2261	25	9.0440	96.6	91.90
U-7Mo-3Zr	0.2106	25	8.4240	95.9	91.23

Densitas logam mengalami perubahan karena penambahan paduan karena massa atom terlarut berbeda dengan massa atom pelarut dan juga karena berubahnya parameter kisi. Perubahan dapat diturunkan dari hukum Vegard, yang mengasumsikan bahwa parameter kisi larutan padat berbanding linier dengan konsentrasi atomik^[1-3]. Secara teoritis unsur-unsur pembentuk ingot paduan memiliki berat jenis masing-masing adalah: U=19,070 g/cm^3 , Mo = 10,02 g/cm^3 dan Zr = 6,4 g/cm^3 . Pengukuran berat jenis ingot paduan U-7Mo, U-7Mo-1Zr, U-7Mo-2Zr, dan U-7Mo-3Zr hasil peleburan menggunakan alat *Ultrapyc 1200e* Version 4.00 diperoleh berturut-turut 17,8628; 17,3517; 17,0335; dan 16,8721 g/cm^3 dan ditampilkan dalam bentuk grafik pada Gambar 2. Dari Gambar 2 terlihat bahwa penambahan unsur Zr kedalam paduan U-7Mo menurunkan berat jenis paduan. Makin tinggi kadar Zr dalam paduan U-7Mo menyebabkan berat jenis paduan menurun dan makin tinggi kadar Zr semakin turun. Penurunan ini disebabkan dengan kenaikan kadar Zr, maka persentase uranium dan molibdenum yang memiliki berat jenis lebih tinggi daripada Zr di dalam paduan U-Mo-Zr menurun, sehingga otomatis berat jenisnya turun. Walaupun demikian paduan

U-7Mo-3Zr dengan berat jenis terendah (16,8721 g/cm^3) dalam penelitian ini masih lebih tinggi dari paduan U_3Si_2 yang hanya sebesar 12,2 g/cm^3 . Berdasar pertimbangan berat jenis paduan, menggunakan paduan U-7Mo-xZr sebagai bahan bakar, densitas uranium dapat ditingkatkan lebih tinggi dibanding menggunakan bahan bakar U_3Si_2 pada volume yang sama.

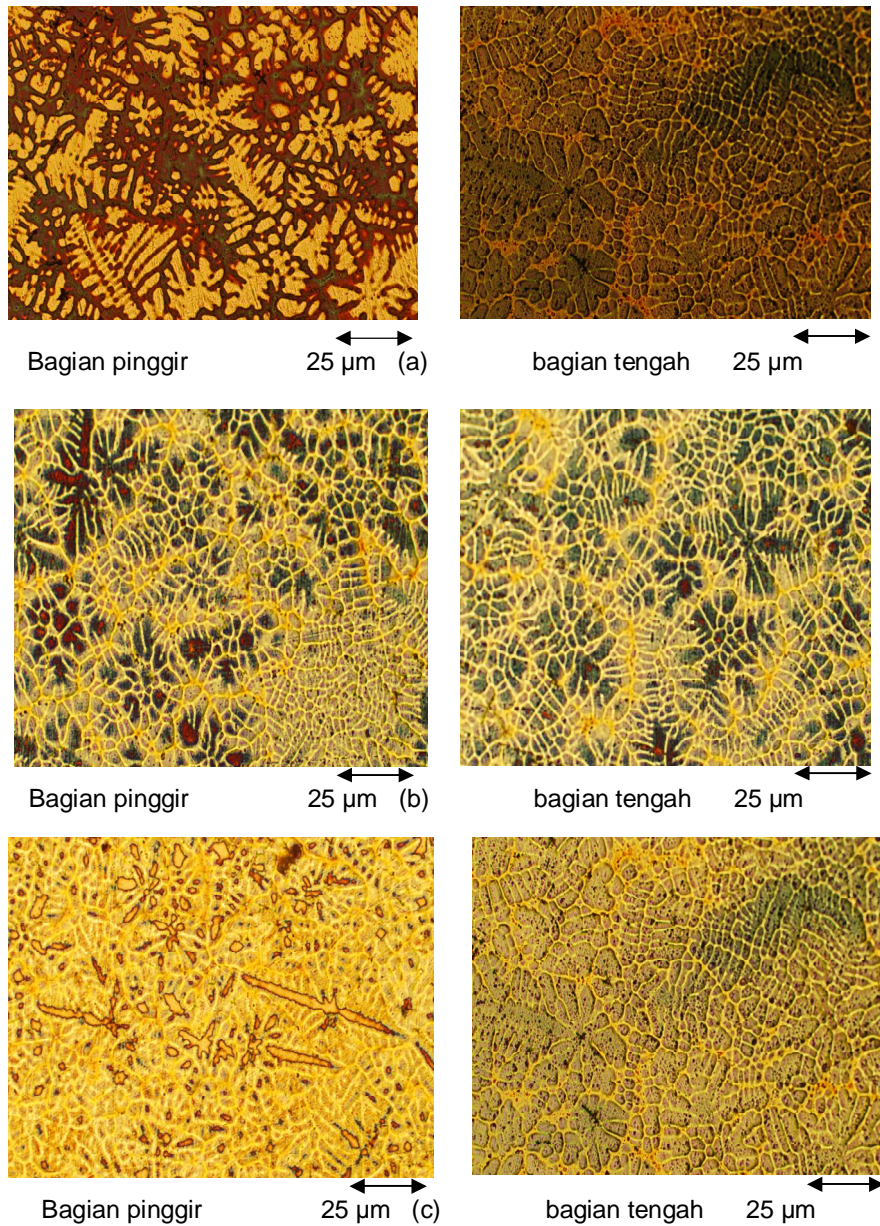


Gambar 2. Hubungan kadar Zr dalam paduan U-7Mo-xZr dengan Berat jenis.

Ingot paduan U-7Mo-xZr hasil proses peleburan diambil sampel pada bagian pinggir dan tengah dan dilakukan pengujian strukturmikro dengan teknik metalografi. Strukturmiko ingot paduan U-7Mo-xZr ditunjukkan pada Gambar 3. terlihat bahwa pada bagian pinggir ingot paduan strukturnya memanjang dan cenderung membentuk

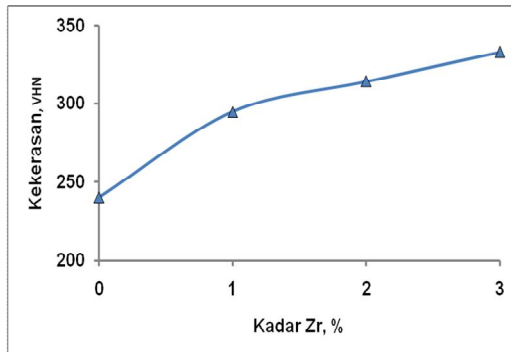
denrit, sedangkan pada bagian tengah ingot cenderung bulat. Terbentuknya denrit pada bagian pinggir ingot karena pada saat peleburan selesai maka akan terjadi pendinginan dari bagian tengah ingot kearah pinggir ingot. Pada bagian pinggir ingot berdekatan dengan pendingin sehingga

panas cepat terambil dan berakibat tidak sempat terjadi pertumbuhan butir, sedangkan pada bagian tengah ingot pendinginan lambat sehingga ada waktu untuk pertumbuhan butir sehingga strukturnya cenderung bulat.



Gambar 3. Strukturmikro ingot paduan (a) U-7Mo-1Zr, (b) U-7Mo-2Zr dan (c) U-7Mo-3Zr

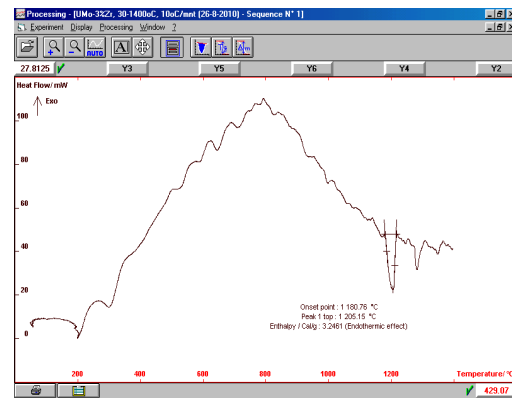
Kekerasan ingot paduan U-7Mo-Zr diuji menggunakan metoda vickers. Penambahan unsur Zr di dalam paduan U-7Mo berpengaruh terhadap kekerasannya. Hasil uji menunjukkan bahwa makin tinggi kadar Zr dalam paduan U-7Mo-Zr, kekerasan meningkat seperti dituangkan pada Gambar 4. Kekerasan paduan U-7Mo, U-7Mo-1Zr, U-7Mo-2Zr dan U-7Mo-3Zr berturut-turut adalah 240,4; 294,6; 314,6; dan 333,2 VHN. Peningkatan kekerasan juga diikuti oleh sifat mekanik lainnya sesuai dengan sifat paduan dan berhubungan dengan ketidak laziman perlakuan pengerasan dengan perubahan struktural dengan mengambil tempat dekat paduan dengan dengan sedikit penambahan Mo. Walaupun kekerasannya meningkat, tetapi paduan U-7Mo-Zr belum bisa dibuat serbuk secara mekanik.



Gambar 4. Hubungan kadar Zr dalam paduan U7MoxZr dan kekerasan

Analisis termal paduan U-7Mo-3Zr dilakukan menggunakan alat *Differential Thermal Analysis (DTA)*. Dari data pengujian yang ditampilkan pada Gambar 5. terlihat

bahwa pemanasan paduan hingga temperatur titik leleh uranium murni (1133°C) paduan masih tetap stabil dan tidak terjadi perubahan sifat termal. Pada temperatur $1180,76^{\circ}\text{C}$ mulai terjadi perubahan fasa dan puncaknya pada temperatur $1205,15^{\circ}\text{C}$ dengan memerlukan energi/ panas sebesar 32461 cal/g . Uranium dan molybdenum berinteraksi peritectic membentuk larutan padat γ -U. Molybdenum menurunkan temperatur dan terjadi perubahan fasa uranium dari $\alpha \rightarrow \beta$ dan $\beta \rightarrow \gamma$.



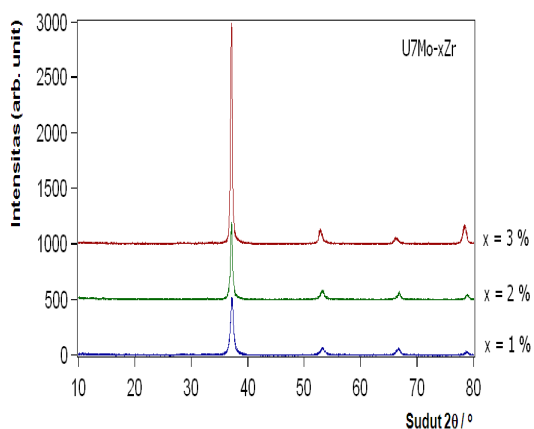
Gambar 5. DTA Ingot Paduan UMo-3%Zr

Komposisi paduan U-7Mo-xZr hasil peleburan memiliki fasa γ . Fasa γ U-7Mo-xZr mudah terdisosiasi menjadi α -U dan γ '-U₂Mo pada pemanasan dibawah temperatur 600°C . Data perhitungan pada Tabel 2, maka komposisi stoikiometri dari paduan tersebut dapat ditentukan berdasarkan % atom seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil perhitungan logam U, Mo, dan Zr berdasarkan % atom

Paduan	% Atom			
	U	Mo	Zr	Total
U-7Mo-1Zr	0.823	0.154	0.023	1
U-7Mo-2Zr	0.804	0.150	0.046	1
U-7Mo-3Zr	0.785	0.147	0.068	1

Dengan demikian senyawa yang terbentuk dalam ingot paduan U-7Mo-1Zr, U-7Mo-2Zr, dan U-7Mo-3Zr berturut-turut adalah $U_{0,823}Mo_{0,154}Zr_{0,023}$, $U_{0,804}Mo_{0,150}Zr_{0,046}$, dan $U_{0,785}Mo_{0,147}Zr_{0,068}$. Hasil pengujian difraksi sinar x terhadap sampel ingot paduan U-7Mo-xZr dengan $x = 1, 2,$ dan 3% berat ditunjukkan pada Gambar 6^[7]. Fasa γ -U paduan U-Mo memiliki keunggulan tahan terhadap iradiasi, dan penambahan Zr ke dalam paduan akan menambah stabilitasnya.



Gambar 6. Pola difraksi sinar-X ingot paduan U-7Mo-xZr^[7]

SIMPULAN

Pengamatan secara visual terhadap ingot paduan U-7Mo-Zr hasil peleburan tidak teramati adanya pori dan oksida dipermukaan serta bersifat ulet. Dari mikrostruktur teramati bahwa pada bagian pinggir terbentuk denrit sedangkan pada bagian tengah butiran berbentuk bulat dan homogen. Kenaikan kadar Zr menyebabkan kekerasan naik, sedangkan berat jenis menurun. Berat jenis terendah dalam penelitian ini adalah paduan U-7Mo-3Zr sebesar $16,8721 \text{ g/cm}^3$. Berat jenis tersebut masih lebih tinggi dibanding berat jenis paduan U_3Si_2 ($12,2 \text{ g/cm}^3$), sehingga cocok untuk disiapkan sebagai kandidat bahan bakar reaktor riset dengan densitas tinggi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Atas terlaksananya penelitian dan penulisan makalah ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada rekan-rekan pegawai di Pusat teknologi Bahan bakar Nuklir/PTBN – BATAN yang telah berkenan berpartisipasi dalam penelitian ini. Semoga tulisan ini bermanfaat untuk pengembangan bahan bakar reaktor riset lebih lanjut.

PUSTAKA

- [1]. U.S. Nuclear Regulatory Commission., (1988), SafetyEvaluation Report Related to the Evaluation Of Low Enriched Uranium Silicide Aluminium Dispersion Fuels for Use in Non Power Reactors, U.S.Nuclear Regulatory Commission Report NUREG-1313.
- [2]. A.GAY, M. BELIERES in COGEMA., (1997), Reprocessing ability of high density fuel for research and test reactor The proceedings of the 20th RERTR meeting, Jackson Hole USA.
- [3]. C.K.KIM,et.al.,(2002), "Status of The Qualification Program For Atomized UMO Dispersion Rod Type Fuel in Korea, Ens RRFM, Belgium.
- [4]. JONG MAN PARK et.al.,(2005), " Phase Stability And Diffusion Characteristics Of U-Mo-X (X=Si, Al, Zr) alloys, RERTRBoston, USA.
- [5]. JONG MAN PARK et.al.,(2006), Interdiffusion Behavior of U-Mo-Zr/Al-Si, Proc 2006 RERTR international meeting, Cape Town, South Africa.
- [6]. LUIS OLIVARES, et.al.,(2007), "Nuclear Fuel Development Based On U-Mo alloys Under Irradiation Evaluation Of LEU U_3Si_2 -4,8gU/cm³ Test Fuel", RERTR, Prague, Czech Republic.
- [7]. IVANOV, O.S, et.al.,(1983), "Phase Diagram of Uranium Alloys, Amerind Publishing co.
- [8]. SUPARDJO, BOYBUL, AGOENG K DAN WISNU A.A.,(2010), Analisis

Struktur dan Komposisi Fasa Paduan
U-7Mo-xZr ($x = 1, 2,$ dan 3 % berat) Hasil
Proses Peleburan, Jurnal Teknologi
Bahan Nuklir, Vol. 6 No.2