
PEMBUATAN DAN KARAKTERISASI INGOT PADUAN U-Zr UNTUK BAHAN BAKAR PWR

Masrukan

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir - BATAN

Kawasan Puspiptek, Serpong, Tangerang Selatan, 15314

e-mail: Masrukan2006@yahoo.com

(Naskah diterima tanggal: 29-08-2012, disetujui tanggal: 21-09-2012)

ABSTRAK

PEMBUATAN DAN KARAKTERISASI INGOT PADUAN U-Zr UNTUK BAHAN BAKAR PWR.

Pembuatan paduan U-Zr melalui cara peleburan untuk bahan bakar PWR telah dilakukan. Mula-mula dibuat ingot paduan U-Zr dengan cara melebur logam U dengan Zr didalam tungku busur listrik yang dilengkapi dengan pendingin air dan dalam suasana gas argon. Pembuatan ingot paduan U-Zr dilakukan pada konsentrasi Zr berturut-turut sebesar 35%, 45%, 55% dan 65% berat. Ingot U-Zr hasil leburan dipotong-potong untuk dikenai pengujian, diantaranya : densitas, kekerasan, mikrostruktur dan fasa. Pengujian densitas dilakukan menggunakan piknometer, kekerasan menggunakan metoda Vickers, mikrostruktur menggunakan mikroskop optic, dan fasa menggunakan XRD. Hasil pengujian densitas menunjukkan bahwa kenaikan jumlah Zr akan menurunkan densitas, sedangkan kekerasan cenderung naik. Pada konsentrasi Zr sebesar 35% (U-35Zr) densitas U-35Zr sebesar 11,2409 g/cc dan pada konsentrasi 65%Zr (U-65Zr) densitas U-65Zr menjadi 8,4673 g/cc, sedangkan kekerasan pada 35%Zr (U-35Zr) sebesar 374 HV dan pada konsentrasi Zr sebesar 65% menjadi 400 HV. Hasil pemeriksaan mikrostruktur menunjukkan bahwa kenaikan Zr akan mengakibatkan bertambahnya jumlah butir dan fasa δ 1 (fasa kedua), sedangkan hasil pengujian fasa menunjukkan bahwa paduan U-Zr yang diuji didominasi oleh fasa δ 1. Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa penambahan Zr mempengaruhi sifat fisik, mekanik, dan mikrostruktur yang terbentuk.

Kata kunci : bahan bakar, U-Zr, PWR.

ABSTRACT

THE MANUFACTURING AND CHARACTERIZATION OF U-Zr INGOT FOR PWR FUEL.

Manufacturing of U-Zr alloy by melting has been done. U-Zr alloy ingot was manufactured by melting U and Zr metal in electric arc furnace equipped with water cooler in argon gas atmosphere. U-Zr alloy was manufactured from various Zr concentrations of 35%, 45%, 55% and 65% weight. The manufactured U-Zr ingot was tested for its density, hardness, microstructure and phases. Density test was done with picnometer, hardness test by Vickers method, microstructure examination with optical microscope, and phases analysis with XRD. The test results show that density of the manufactured alloy decreases with increasing Zr concentration, while hardness increases with increasing Zr concentration. The density of the manufactured alloy is 11,2409 g/cc at Zr concentration of 35% (U-35Zr) and 8,4673 g/cc at Zr concentration of 65% (U-65Zr), while the hardness is 374 HV at 35% (U-35Zr) and 400 HV at Zr concentration of 65%. The microstructure examination shows that increasing of Zr will increase

the amount of grains and $\delta 1$ phases, while the phases test indicates that the manufactured U-Zr is dominated by $\delta 1$ phases. It can be concluded that adding of Zr will influence the physical behavior, mechanical properties and microstructure of the manufactured U-Zr alloy.

Key words: bahan bakar, U-Zr, PWR.

PENDAHULUAN

Penelitian dan pengembangan bahan bakar nuklir di Indonesia dilakukan oleh Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir (PTBN) - Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN). Dalam pengembangan bahan bakar nuklir tersebut, penelitian dan pengembangan dibagi menjadi dua jalur yaitu pengembangan bahan bakar untuk reaktor daya dan riset. Pengembangan bahan bakar reaktor daya ditujukan untuk mendapatkan prototipe elemen bakar PWR dan mendapatkan berkas bahan bakar HWR/Cirene, sedangkan pengembangan bahan bakar reaktor riset ditujukan untuk mendapatkan bahan bakar baru berdensitas tinggi dari paduan UN, U-Mo dan U-Zr^[1].

Dalam jangka panjang, PTBN melakukan pengembangan bahan bakar dari paduan U-Zr untuk bahan bakar reaktor riset maupun reaktor daya dalam bentuk *hidrida* (U-ZrHx) untuk reaktor jenis PWR (*Pressurized Water Reactor*). Bahan bakar reaktor jenis PWR dapat berupa bahan bakar keramik UO₂, hidrida uranium zirconium maupun campuran keramik dengan metal. Penggunaan bahan bakar paduan U-Zr telah lama digunakan secara luas dalam bentuk U-ZrHx untuk bahan bakar reaktor TRIGA (*Training Isotop by General Atomic*), dan dalam bentuk campuran U, Pu dan Zr untuk reaktor jenis FBR (*Fast Breeder Reactor*) serta EBR (*Experiment Breeder Reactor*)^[2]. Desain bahan bakar baru telah diusulkan untuk mengganti bahan bakar UO₂ dengan uranium hidrida (U-ZrHx), dimana dalam desain bahan bakar baru tersebut diperoleh keuntungan yaitu dapat ditempatkan hidrogen sebagai moderator secara langsung di dalam bahan bakar yang memungkinkan reaktor dapat beroperasi

pada temperatur yang relatif tinggi (hingga 750 °C) serta mempunyai sifat termal lebih baik dibandingkan bahan bakar keramik^[3]. Selain itu, penggunaan uranium sebagai bahan bakar uranium hidrida (U-ZrHx) membutuhkan uranium yang relatif sedikit dibandingkan dengan bahan bakar jenis lain, seperti bahan bakar keramik UO₂. Kelebihan yang dimiliki bahan bakar uranium hidrida ini berdampak langsung terhadap nilai ekonomis disamping nilai investasi bahan bakar hidrida yang relatif lebih rendah dan ekonomis daripada bahan bakar jenis keramik UO₂.

Penggunaan bahan bakar paduan U-Zr dalam bentuk U-ZrHx mempunyai beberapa keuntungan, diantaranya^[4]: (a) *prompt negative coefficient of reactivity* yang tinggi, (b) Secara kimia cukup stabil (dapat di-*quenching* pada temperatur 1200 °C tanpa adanya interaksi dengan air, (c) mempunyai integritas penuh terhadap kelongsong dari bahan *stainless steel* dan alloy 88 pada operasi reaktor hingga 950 °C, (d) mampu menahan produk fisi yang cukup tinggi, dan (e) Mempunyai sifat termal lebih baik daripada bahan bakar keramik UO₂.

Berdasarkan uraian di atas, maka pada tahap awal penelitian ini dilakukan penelitian untuk membuat ingot paduan U-Zr U-Zr untuk bahan bakar PWR dan karakterisasinya, yang mana ingot tersebut kelak dapat diproses lebih lanjut menjadi bahan bakar hidrida uranium zirconium (U-ZrHx). Pada tahap awal penelitian ini dilakukan penelitian pendahuluan dengan membuat ingot paduan U-Zr dari logam U dan Zr pada variasi komposisi Zr berturut-turut sebesar 35% Zr, 45% Zr, 55% Zr dan 65% Zr serta dilanjutkan dengan karakterisasinya. Pembuatan ingot U-Zr dilakukan dengan cara melebur logam U

dan Zr di dalam tungku busur listrik dalam suasana gas Ar, yang mana pelaksanaan peleburan dilakukan pada besaran arus 120 A dan diulang hingga lima kali. Karakterisasi pada ingot meliputi :kekerasan, termal (DTA dan DSC), sifat fisik (densitas), mekanik (kekerasan) dan mikrostruktur. Ingot yang telah dikarakterisasi nantinya dapat dibuat serbuk U-ZrHx yang dapat digunakan untuk bahan bakar PWR. Perubahan komposisi Zr akan mempengaruhi sifat-sifat paduan U-Zr yang terbentuk, diantaranya sifat mekanik, termal, fisik dan mikrostruktur. Serangkaian percobaan yang dilakukan tersebut bertujuan untuk membuat ingot paduan U-Zr yang terkarakterisasi dan dapat digunakan untuk membuat bahan bakar reaktor PWR.

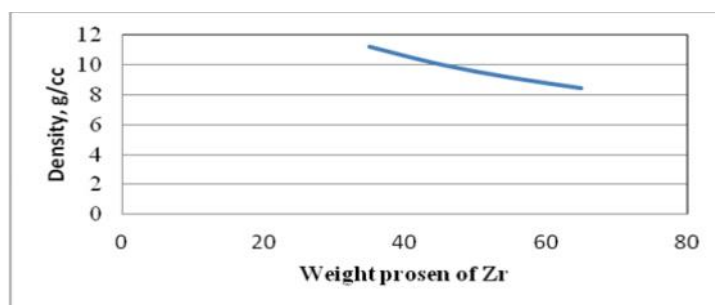
TATA KERJA

Logam U yang berbentuk serpihan dipotong-potong sehingga menjadi berukuran lebih kurang 10 mm x 5 mm x 2 mm. Demikian juga logam Zr (berbentuk *sponge*) dipotong-potong menjadi berukuran lebih kurang 2 mm x 2 mm x 2 mm. Bahan baku logam U dan Zr yang telah dipotong-potong selanjutnya ditimbang sesuai dengan komposisi yang direncanakan, yaitu : 35% U dan 65% Zr; 45% U dan 55% Zr; 55% U dan 45% Zr; dan 65% Zr dan 35% U. Langkah selanjutnya yaitu memasukkan logam U dan Zr tersebut ke dalam tungku peleburan dan dilakukan peleburan menggunakan arus 100 A. Hasil peleburan berupa ingot berbentuk lingkaran dengan ukuran diameter 14 mm dan

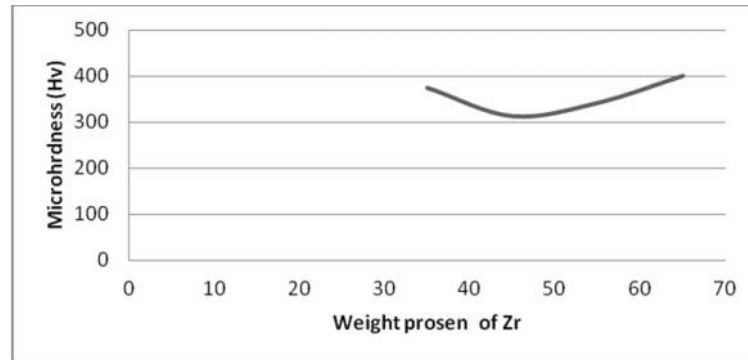
ketebalan 5 mm kemudian dipotong-potong untuk dilakukan pengujian sifat-sifat yang berkaitan dengan bahan bakar, diantaranya: densitas, kekerasan, dan mikrostruktur. Pengujian densitas dilakukan dengan menggunakan peralatan piknometer, kekerasan dengan peralatan uji kekerasan mikro, mikrostruktur dengan menggunakan mikroskop optik dan fasa dengan menggunakan XRD.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengujian densitas dengan menggunakan peralatan *autopycnometer* ditampilkan dalam Gambar 1 dan Tabel 1 di Lampiran. Tabel 1 memperlihatkan penurunan densitas paduan U-Zr apabila kandungan Zr semakin bertambah. Sebagai contoh, untuk kandungan Zr 35% (U-35% Zr) nilai densitas adalah sebesar 11,2409 g/cc akan turun menjadi 10,0612 g/cc pada kandungan Zr 45% (U-45% Zr). Demikian pula untuk kandungan Zr yang lain akan mengalami kecenderungan yang sama. Hal ini disebabkan oleh nilai densitas logam Zr yang lebih rendah dibandingkan dengan densitas logam U sehingga pada penambahan Zr yang semakin tinggi mengakibatkan nilai densitas paduan U-Zr menjadi semakin rendah. Densitas logam U adalah sebesar 19,1 g/cc sedangkan logam Zr sebesar 5,32 g/cc^[5]. Densitas untuk bahan bakar diharapkan tinggi agar uranium yang dapat dimuatkan ke dalam bahan bakar per satuan volum menjadi lebih banyak.



Gambar 1. Kurva hasil pengujian densitas paduan U-Zr.

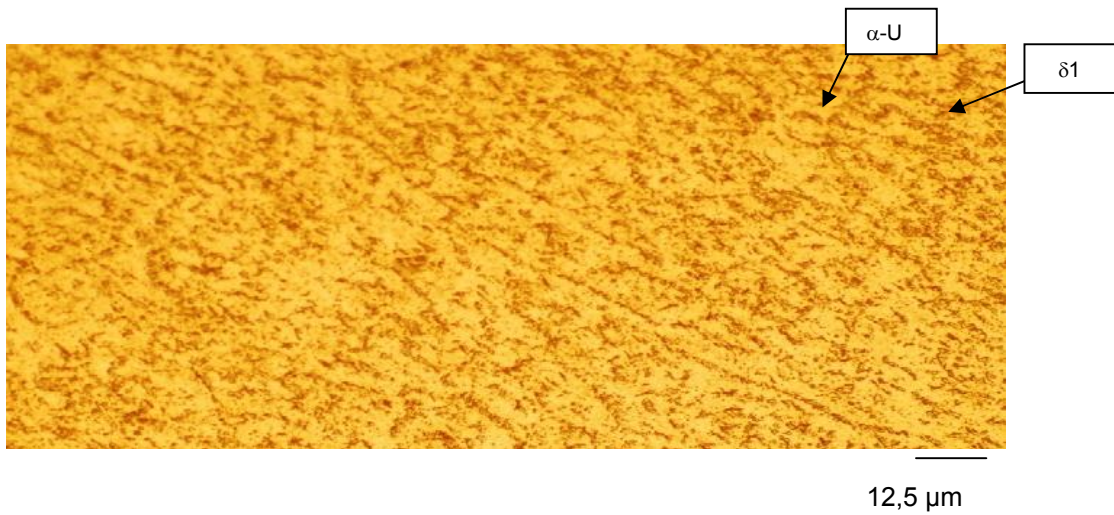


Gambar 2. Kurva kekerasan terhadap prosentase Zr dalam paduan U-Zr.

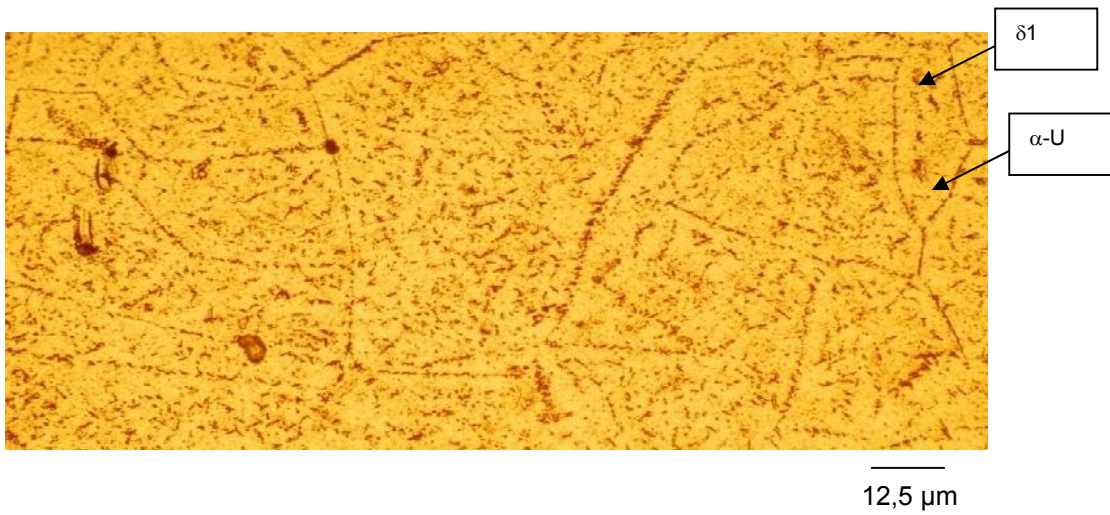
Hasil pengujian kekerasan mikro ditampilkan dalam bentuk kurva seperti pada Gambar 2 dan Tabel 1 di Lampiran. Gambar 2 dan Tabel 2 di lampiran yang menampilkan hasil pengujian kekerasan mikro memperlihatkan penurunan kekerasan pada kandungan Zr dari 35% menjadi 45%, tetapi kemudian mengalami kenaikan kekerasan pada kenaikan Zr lebih tinggi. Hal ini disebabkan pada kandungan Zr sebesar 45% sampel tidak homogen sehingga pada pengujian kekerasan indentor mengenai daerah sampel yang mempunyai tingkat kekerasan rendah. Pada kandungan Zr mencapai 55% dan 65%, kekerasan naik lagi. Hal ini disebabkan penambahan unsur Zr akan mengakibatkan terbentuknya fasa δ_1 (UZr_2) semakin banyak dan butir yang terbentuk semakin halus. Apabila fasa δ_1 yang terbentuk semakin banyak dan butir yang terbentuk semakin halus maka gerakan dislokasi menjadi semakin sulit bergerak sehingga paduan yang terbentuk menjadi lebih keras.

Pemeriksaan mikrostruktur dengan menggunakan mikroskop optik ditampilkan pada Gambar 3.a hingga 3.d Gambar 3.a dan 3.b memperlihatkan mikrostruktur dengan ukuran butir dari kecil (halus) menjadi berukuran lebih besar (kasar),

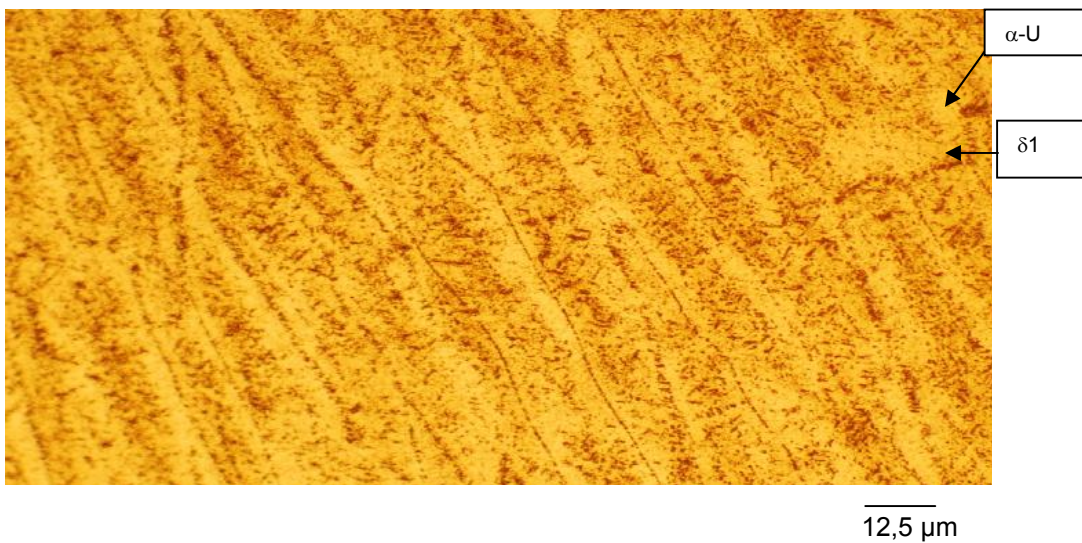
selanjutnya dari Gambar 3.b ke Gambar 3.c dan 3.d memperlihatkan ukuran butir yang semakin kecil (halus). Hal ini disebabkan kondisi sampel tidak homogen (Gambar 3.b) sehingga menghasilkan mikrostruktur cenderung semakin membesar dan jumlah fasa semakin berkurang. Namun, pada Gambar 3.c dan 3.d ukuran butir semakin halus disertai jumlah fasa δ_1 yang semakin bertambah. Bertambahnya ukuran butir dan jumlah fasa δ_1 semakin turun kekerasan paduan, sebaliknya semakin halus ukuran butir dan bertambahnya jumlah fasa mengakibatkan naiknya kekerasan paduan. Penambahan unsur pepaduan akan mengakibatkan bertambahnya jumlah butir dan fasa δ_1 , karena unsur yang ditambahkan akan menjadi awal terbentuknya inti butir dan pada pemanasan lebih lanjut inti-inti yang terbentuk akan berubah menjadi butir-butir. Apabila dilihat dalam diagram fasa antara U dengan Zr terlihat penambahan Zr ke dalam logam U akan membentuk fasa α -U, yang mana semakin banyak Zr yang ditambahkan maka fasa δ_1 akan semakin meningkat jumlahnya sedangkan fasa α -U semakin berkurang. Fasa δ_1 akan terbentuk secara total pada komposisi Zr sebesar 78% atom^[6].



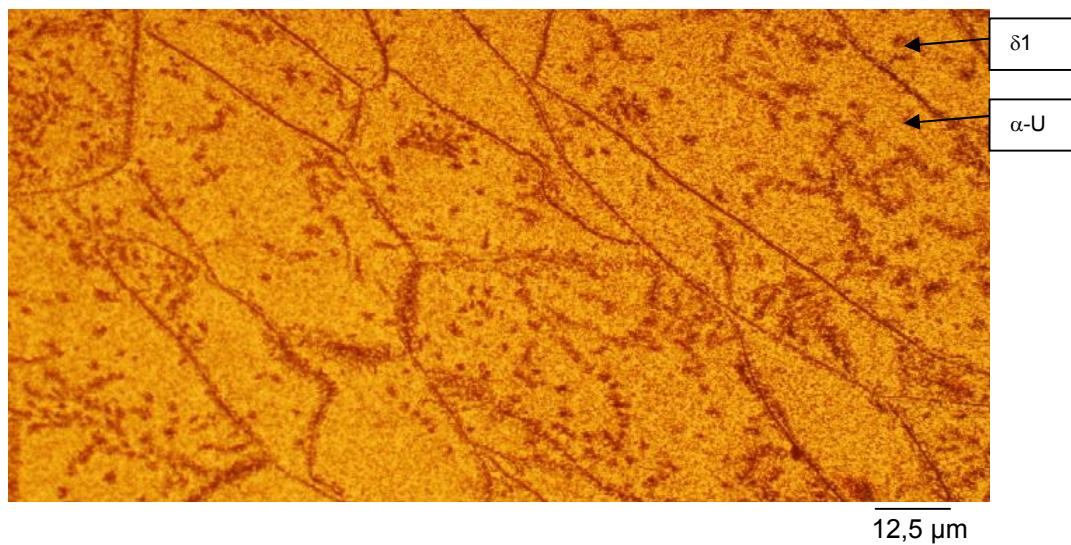
3.a. Mikrostruktur U-35Zr, diambil dengan menggunakan mikroskop optik.



3.b. Mikrostruktur U-45Zr, diambil dengan menggunakan mikroskop optik.



3.c. Mikrostruktur U-55Zr, diambil dengan menggunakan mikroskop optik.



3.d. Mikrostruktur U-65Zr, diambil dengan menggunakan mikroskop optik.

Gambar 3. Mikrostruktur U-Zr pada berbagai komposisi Zr, diambil dengan menggunakan mikroskop optik.

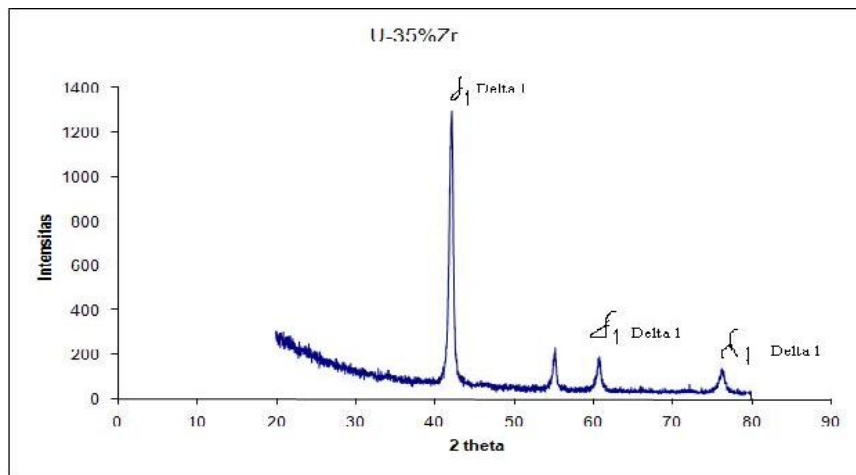
Gambar 4.a hingga 4.c memperlihatkan kurva sudut 2θ terhadap intensitas sinar hasil pengujian XRD untuk menentukan fasa yang terbentuk dari hasil peleburan U-35Zr, U-45Zr, dan U-55Zr. Hasil pengujian yang ditampilkan pada Gambar 4.a hingga c merupakan kurva antara sudut 2θ terhadap intensitas sinar memperlihatkan bahwa fasa yang terbentuk pada paduan U-35Zr, U-45Zr, dan U-55Zr didominasi oleh fasa $\delta 1$ (UZr₂). Hal ini sesuai dengan hasil pemeriksaan mikrostruktur menggunakan mikroskop optik. Fasa $\delta 1$ (UZr₂) mempunyai struktur heksagonal dengan parameter kisi $a = 5,03 \text{ \AA}$ dan $b = 3,08 \text{ \AA}$. Perhitungan sudut 2θ dengan menggunakan rumus^[7]:

$$n\lambda = 2d \sin \theta, \text{ dengan}$$

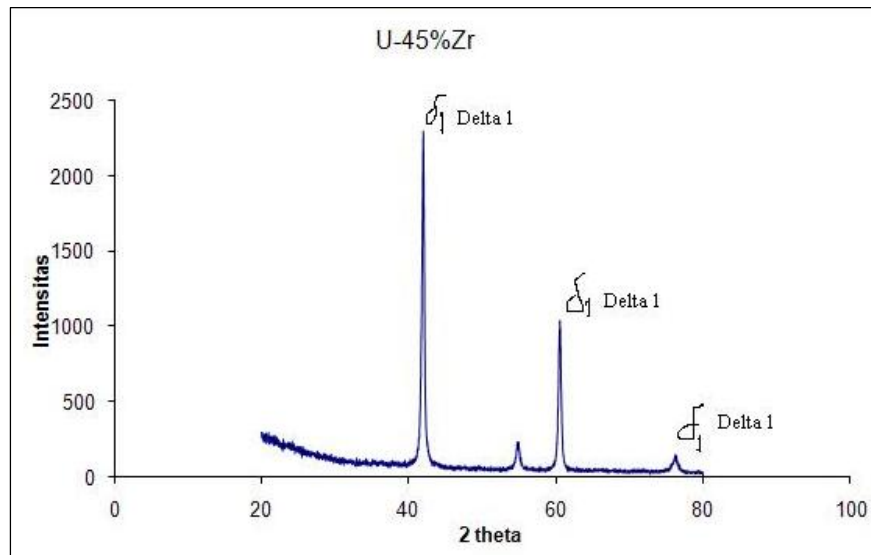
$$d = 1/d^2 = \frac{4/3 h^2 + hk + k^2 + l^2/c^2}{a^2}$$

Dalam rumus tersebut, λ merupakan panjang gelombang dari sinar yang digunakan, dan d adalah jarak antar bidang, sedangkan a, b, c adalah panjang panjang kisi dan h, k, l adalah indeks Miller. Dalam perhitungan tersebut sumber sinar

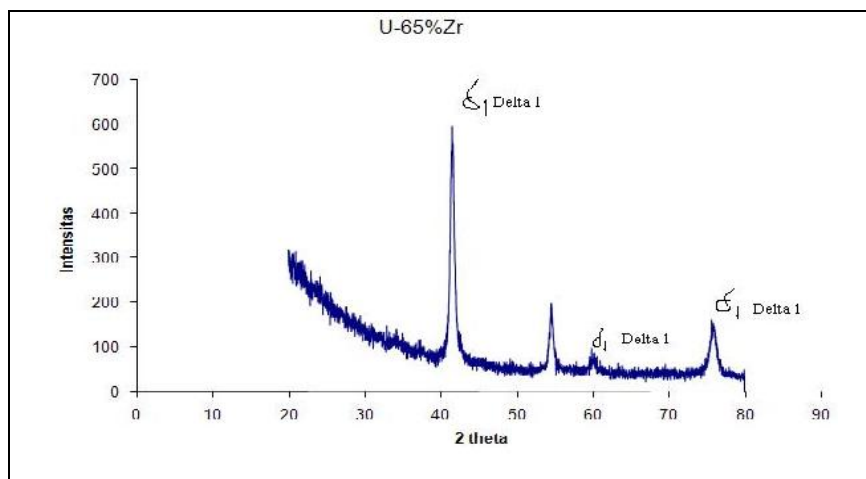
yang digunakan adalah dari logam Cu sehingga harga panjang gelombang (λ) adalah sebesar $1,54 \text{ \AA}$ ^[7]. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa fasa yang terbentuk adalah fasa $\delta 1$ (UZr₂) pada semua sampel uji U-Zr yang mempunyai konsentrasi Zr sebesar 35%, 45%, 55% dan 65%. Fasa $\delta 1$ muncul pada sudut 2θ masing-masing sebesar 42° , 60° dan 76° untuk sampel U-35Zr, U-45Zr dan U-65Zr sedangkan untuk paduan U-55Zr muncul pada sudut 2θ sebesar $28,3646^\circ$; $47,1684^\circ$; dan $55,8464^\circ$. Hasil pengujian menggunakan XRD dapat dilihat dalam Tabel 3.a hingga 3.d pada Lampiran. Fasa $\delta 1$ merupakan fasa yang terbentuk antara U dengan Zr setelah batas kelarutan Zr di dalam U terlampaui. Hasil pengujian dengan XRD yang didominasi oleh fasa $\delta 1$ tersebut bersesuaian dengan diagram fasa antara U dengan Zr. Dari diagram fasa U-Zr seperti ditampilkan pada Gambar 1 di Lampiran terlihat bahwa apabila semakin tinggi konsentrasi logam Zr maka fasa $\delta 1$ yang terbentuk akan semakin banyak hingga konsentrasi Zr mencapai 78% atom^[6].



4.a. Kurva antara sudut 2θ terhadap intensitas sinar, ingot paduan U-35Zr.



4.b. Kurva antara sudut 2θ terhadap intensitas sinar, ingot paduan U-45Zr.



4.c. Kurva antara sudut 2θ terhadap intensitas sinar, ingot paduan U-65Zr.

SIMPULAN

Dari hasil percobaan pembuatan ingot dan karakterisasi paduan U-Zr untuk bahan bakar reaktor PWR dapat disimpulkan bahwa pembuatan ingot paduan U-Zr menggunakan tungku busur listrik menghasilkan ingot paduan U-Zr yang belum homogen. Perubahan komposisi Zr mempengaruhi sifat fisik, mekanik, dan mikrostruktur. Penambahan Zr akan menurunkan densitas, sedangkan kekerasan paduan U-Zr naik. Pada kandungan Zr sebesar 35% densitas U-Zr sebesar 11,2409 g/cc dan pada komposisi 65%Zr densitas U-Zr menjadi 8,4673 g/cc, sedangkan kekerasan paduan U-Zr naik dari 374 HV pada 35% Zr menjadi 400 HV pada 65% Zr. Hasil pemeriksaan mikrostruktur menunjukkan bahwa penambahan Zr akan memperhalus butir dan menambah jumlah fasa δ_1 yang terbentuk. Sementara itu hasil pengujian fasa menunjukkan bahwa paduan U-Zr dari 35% Zr hingga 65% Zr didominasi oleh fasa δ_1 .

DAFTAR PUSTAKA

[1]. Anonim. (2010). Rencana Strategi Pusat

Teknologi Bahan Bakar Nuklir (PTBN), Batan tahun 2010-2014.

- [2]. [Http://en.wikipedia.org/wiki/Experimental_Breeder_Reaktor II](http://en.wikipedia.org/wiki/Experimental_Breeder_Reaktor_II). Download: tanggal 4-1-2008.
- [3]. Elvina Finzi, (2006). *An IPWR For Planetary Exploration Pre Feasibility Study*. Politecnico Milano, April 2006.
- [4]. Kaufmann A .(1972). *Nuclear Reaktor Fuel Elements*. Metallurgy And Fabrication, U S Atomic Energy Commission.New York. Interscience Publisers, Jhon Wiley and Sons. Halaman 82-83.
- [5]. Foter A R, Wrigth R L, (1975). *Basic Nuclear Engineering*, Boston. Second Edition, Allyn and Bacon, Inc.,.Hlm. 174, 459, 460.
- [6]. Ivanov O S, (1983). *Phase Diagrams of Uranium Alloys*, New Delhi: Amerind Publishing Co, PVT, Ltd. Halaman: 8-11, 55.
- [7]. Cullity,(1978). *Elements of X-Raya Diffraction*, Philipines: Addison-Wisley Publishing Companay, Inc. Hlm. 87, 189.

Lampiran

Tabel 1. Densitas paduan U-Zr pada berbagai variasi Zr.

No	Jenis sampel	Densitas rata-rata
1.	U-35Zr	11,2409 g/cc
2.	U-45Zr	10,0612 g/cc
3.	U-55Zr	9,1749 g/cc
4.	U-65Zr	8,4673 g/cc

Tabel 2. Data uji kekerasan mikro terhadap U-Zr pada berbagai variasi.

Jenis sampel	D ₁ (diameter)	D ₂ (diameter)	D rata-rata	HV	Hv rata-rata
U-35Zr	31,2	31,4	31,3	379	
	32,1	32,0	32,1	360	374
	31,2	31,0	31,1	383	
U-45Zr	34,2	34,4	34,3	315	
	35,2	34,8	35	303	311,67
	34,2	34,2	34,2	317	
U-55Zr	33,8	33,0	33,4	332	
	33,0	32,4	32,7	347	340,67
	32,6	33,2	32,9	343	
U-65Zr	30,4	30,0	30,2	407	
	30,6	30,8	30,7	394	400
	30,8	30,2	30,5	399	

Tabel 3.a Hasil pengujian XRD untuk paduan U-35Zr.

No.	Pos. [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]	FWHM [°2Th.]	Area [cts*°2Th.]	Backgr. [cts]	Height [cts]
1	28.361	3.1444	11.83	0.9446	24.2	117	25.97
2	32.5625	2.7476	33.12	0.3936	28.24	140	72.72
3	34.9825	2.5629	87.47	0.2362	44.74	167	192.05
4	35.6436	2.5168	100	0.3149	68.2	173	219.57
5	36.336	2.4705	47.77	0.3149	32.58	177	104.89
6	39.5189	2.2785	96.9	0.1574	33.05	172.56	212.78
7	51.2644	1.7807	80.86	0.3936	68.94	209	177.55
8	60.4258	1.5308	79.03	0.4723	80.85	235.79	173.54
9	64.7942	1.4377	40.6	0.6298	55.38	260	89.15
10	76.6509	1.2422	64.06	0.576	108.02	281	140.65

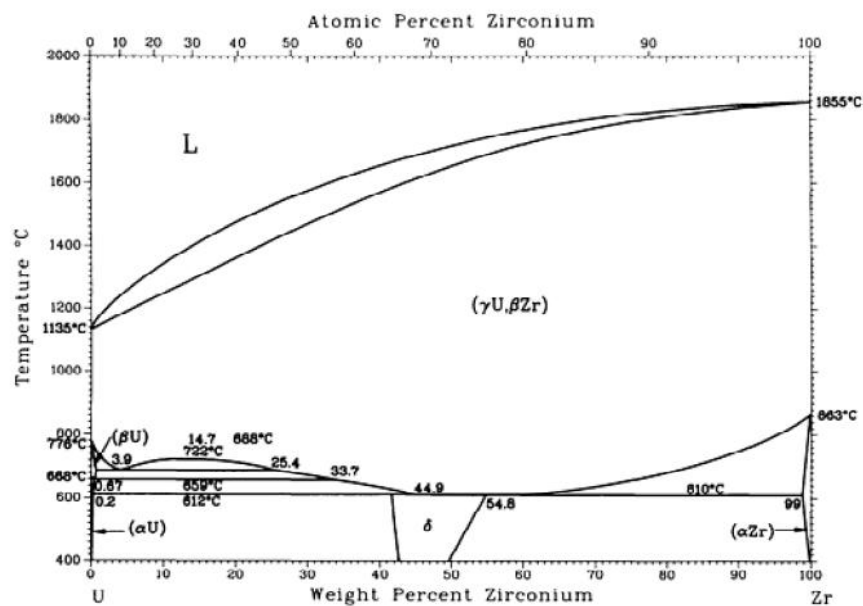
Lampiran

Tabel 3.b. Hasil pengujian XRD untuk paduan U-45Zr.

No.	Pos. [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]	FWHM [°2Th.]	Area [cts*°2Th.]	Backgr. [cts]	Height [cts]
1	32.3605	2.7643	33.58	0.3936	21.51	113.52	55.41
2	34.7632	2.5785	100	0.2755	44.85	130	165.02
3	35.4809	2.5280	94.54	0.2362	36.35	134	156.02
4	39.371	2.2867	92.37	0.3936	59.19	129	152.43
5	51.0464	1.7878	86.4	0.3149	44.29	148	142.58
6	60.2736	1.5343	66.45	0.551	59.61	162	109.66
7	64.7062	1.4394	30.52	0.7872	39.11	181	50.36
8	67.1804	1.3923	19.4	0.9446	29.83	184	32.01
9	76.5971	1.2429	59.02	0.768	99.73	192	97.4

Tabel 3.c. Hasil pengujian XRD untuk paduan U-65Zr.

No.	Pos. [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]	FWHM [°2Th.]	Area [cts*°2Th.]	Backgr. [cts]	Height [cts]
1	41.5391	2.52433	100	0.4723	230.78	67	495.32
2	54.6013	1.95167	29.33	0.3936	56.4	40	145.26
3	60.2412	1.78381	8.02	0.9446	37.01	31	39.72
4	75.9585	1.45359	22.89	0.864	130.64	29	113.4

Gambar 1. Diagram fasa U-Zr^[6].