

PENGARUH PEMADU Mo PADA KEKUATAN MEKANIK DAN KETAHANAN KOROSI PADUAN Zr-1% Sn-1% Nb-1% Fe

Sugondo

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

E-mail: sugondo@batan.go.id

(Naskah diterima: 05-09-2011, disetujui: 29-09-2-11)

ABSTRAK

PENGARUH PEMADU Mo PADA KEKUATAN MEKANIK DAN KETAHANAN KOROSI PADUAN Zr-1% Sn-1% Nb-1% Fe. Penelitian paduan Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe-(x)%Mo telah dilakukan. Ingot disiapkan dengan teknik busur listrik. Analisis kimia dilakukan dengan XRF, metalografi dengan mikroskop optik, uji kekerasan dengan kekerasan mikro vickers, dan uji korosi dengan *autoclave*. Tujuan penelitian ini membuat paduan Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe-(x)%Mo dengan memvariasikan penambahan Mo dengan berbagai komposisi, membandingkan pengaruh kandungan Mo terhadap karakteristik logam paduan Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe meliputi mikrostruktur, homogenitas komposisi, kekuatan mekanik dan ketahanan korosi uap air, dan menentukan kandungan Mo yang paling optimal pada paduan Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe-(x)%Mo untuk pembuatan kelongsong bahan bakar nuklir yang memiliki ketahanan korosi dan kekerasan yang tinggi. Hasil yang diperoleh adalah sebagai berikut: Pemasu Mo dapat memperhalus butir pada konsentrasi 0,1%-0,3% dan lebih besar dari pada konsentrasi itu dapat memperbesar butir. Kekerasan paduan Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe-(x)%Mo dikendalikan oleh *flaw* atau dislokasi, interstisi unsur pemasu yang lebih keras, kelarutan padat unsur pemasu, dan terbentuknya fasa kedua ZrMo₂. Laju korosi paduan Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe-(x)%Mo dikendalikan oleh adanya fasa kedua ZrMo₂. Konsentrasi Mo 0,3 % pada paduan Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe-(x)%Mo ini paling baik untuk pembentukan fasa kedua. Konsentrasi Mo antara 0,3-0,5 % pada paduan Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe-(x)%Mo baik untuk pembentukan presipitat dan kelarutan padat.

Kata Kunci: paduan Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe-(x)%Mo, ketahanan korosi, kekuatan mekanik.

ABSTRACT

EFFECT OF ALLOYING MO ON MECHANICAL STRENGTH AND CORROSION RESISTANCE OF Zr-1% Sn-1% Nb-1% Fe alloy. It had been done research on Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe-(x)%Mo alloy. The ingot was prepared by means of electrical electrode technique. The chemical analysis was identified by XRF, the metallography examination was perform by a optical microscope, the hardness test was done by Vickers microhardness, and the corrosion test was done in *autoclave*. The obyective of this research were making Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe-(x)%Mo alloy with Mo concentration; comparing effect of Mo concentration to metal characteristics of Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe which covered microstructure; composition homogeneity, mechanical strength; and corrosion resistance in steam, and determining the optimal Mo concentration in

Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe-(x)% Mo alloy for nuclear fuel cladding which had corrosion resistance and high hardness. The results were as follow: The alloying Mo refined grains at concentration in between 0,1%-0,3% and the concentration more than that could coarsened grains. The hardness of the Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe-(x)%Mo alloy was controlled either by the flaw or the dislocation, the interstition of the harder alloying element, the solid solution of the alloying element and the second phase formation of ZrMo₂. The corrosion rate of the Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe-(x)%Mo alloy was controlled by the second phase of ZrMo₂. The 0.3% Mo concentration in Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe-(x)%Mo alloy was the best for second phase formation. The Mo concentration in between 0,3-0,5 % in Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe-(x)%Mo alloy was good for the second phase formation and the solid solution.

Keywords: Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe-(x)%Mo alloy, mechanical strength, corrosion resistance,

PENDAHULUAN

Dalam reaktor nuklir, zirkaloi diperlukan sebagai pelindung bahan bakar dari pendingin, pengungkung gas hasil fisi, pemindah panas, dan bahan struktur. Dengan demikian maka zirkaloi harus mempunyai sifat mekanik yang baik, tahan korosi, dan serapan neutron rendah. Sebagai contoh, zircaloy-2 untuk reaktor air didih (BWR) dan zircaloy-4 digunakan untuk reaktor air bertekanan (PWR) dengan suhu kelongsong 349°C untuk PWR dan 390°C untuk BWR^[1].

Untuk meningkatkan efisiensi reaktor maka daya kumulatif harus ditingkatkan tetapi yang menjadi masalah adalah bahwa bahan kelongsong zircaloy-2 dan zircaloy-4 tidak tahan korosi pada kondisi ini. Bahan kelongsong lain yang tahan korosi ialah zirloy (Zr-1%Nb-1%Sn)^[2]. Penambahan pemasu besi dengan konsentrasi antara 0,2-1% pada paduan Zr-1%Sn dapat menurunkan laju korosi^[3] dan gejala yang sama pada paduan Zr-1%Nb. Berdasarkan fakta ini maka telah dikembangkan paduan kwarter Zr-1%Nb-1%Sn-(0,2-1%)Fe^[4].

Pengembangan paduan Zr-Sn-Nb-Fe utamanya untuk kelongsong bahan bakar pada derajat bakar tinggi. Keunggulan paduan tersebut ialah: Pertama, temperatur pendingin dapat ditingkatkan. Efisiensi daya lebih mudah dicapai jika suhu operasi teras

dinaikkan menjadi antara 400 – 600 °C. Kedua, konsentrasi litium (Li) dalam pendingin dapat lebih tinggi. Dalam pengoperasian reaktor PWR, pH harus dijaga dengan ketat karena sangat menentukan kelarutan oksida. Pengoperasian reaktor pada pH tinggi (sekitar pH 7,4) merupakan salah satu cara yang efektif untuk menurunkan radioaktivitas air reaktor, tetapi di atas pH 7,4 memang bagus ditinjau dari paparan radiasi (laju kelarutan oksida/krud akan turun) tetapi akan menyebabkan terjadinya korosi (*crack*) pada material *tube* pembangkit uap dan kerusakan (korosi) material kelongsong bahan bakar. Ketiga, pengurangan *creep dan growth* akibat iradiasi. Keempat, mengurangi *pick-up* hydrogen. Kelima, ketahanan korosinya lebih tinggi dibandingkan dengan zircaloy-2 (Zry-2) dan zircaloy-4 (Zry-4). Keunggulan itu diketahui setelah uji *pasca* iradiasi (*post irradiation examination/PIE*) dari hasil iradiasi dengan derajat bakar (*burn-up*) 70.000 MWd/Te^[5].

Prinsip keunggulan utama zirkonium sebagai bahan struktur reaktor termal adalah mempunyai sifat nuklir spesifik yaitu serapan neutron rendah. Untuk memenuhi penyediaan tersebut ada batasan unsur pemasu antara lain: Pertama, koefisien serapan neutron termal unsur pemasu harus rendah dan setelah iradiasi mempunyai umur paro radiasi pendek, sebagai contoh kobal. Kedua,

pemadu harus menjadikan paduan tahan korosi dan tangkapan hydrogen rendah selama berinteraksi pada lingkungan yang agresif. Ketiga, pemadu harus memberikan sifat mekanik paduan yang memenuhi syarat, seperti kemampuan pelasan. Keempat, pemadu harus menjamin sifat dan dimensi yang stabil pada berkas elemen bakar selama operasi. Sifat-sifat unsur utama dan pemadunya ditunjukkan pada Tabel 1^[6]:

Penambahan unsur pemadu timah (Sn) dimaksudkan untuk meningkatkan kekuatan zirkaloy meskipun dapat mengurangi ketahanan korosi. Pada konsentrasi 1,2-1,7% Sn yang ditambahkan ke bahan utama Zirkonium akan meningkatkan ketahanan paduan Zirkonium terhadap korosi.

Ketahanan korosi pada zirkaloy dapat ditingkatkan juga dengan penambahan unsur niobium (Nb). Penambahan sedikit Nb sekitar 0,05-0,2% dapat mengurangi pertambahan berat (ΔW). Sementara penambahan Nb lebih besar dari 0,2% dapat meningkatkan ketahanan terhadap korosi dan meningkatkan kekerasan pada suhu tinggi. Pada penambahan besi (Fe) dan perlakuan panas pada temperatur tertentu (500°C) mengakibatkan paduan Zirkonium memiliki ketahanan korosi paling baik. Fungsi Fe juga untuk meningkatkan keuletan dan kekuatan^[7]. Molybdenum merupakan salah satu unsur pemadu yang mempunyai kekuatan tarik, kekerasan dan ketahanan korosi yang tinggi^[7].

Tabel 1. Sifat-sifat unsur Zr, Fe, Nb, Sn dan Mo^[6]

Sifat	Unsur				
	Zr	Fe	Nb	Sn	Mo
Radius Atom (Å)	1,60	1,26	1,46	1,62	1,39
Volume Atom (cm ³ /mol)	14,1	7,1	10,8	16,3	9,4
Massa Atom (g/mol)	91,224	55,847	92,906	118,710	95,940
Titik Didih (K)	4682	3023	5015	2876	4912
Radius Kovalensi (Å)	1,45	1,17	1,34	1,41	1,30
Struktur Kristal	Heksagonal	BCC	BCC	Tetragonal	BCC
Massa Jenis (g/cm ³)	6,51	7,86	8,58	7,31	10,28
Konduktivitas Listrik ($\Omega^{-1}/\text{cm}^{-1}$)	2,3x10 ⁶	11,2x10 ⁶	6,6x10 ⁶	8.7x10 ⁶	17,3X10 ⁶
Elektronegativitas (Pauling)	1,33	1,83	1,60	1,96	2,16
Konfigurasi Elektron	[Kr] 4d2 5s2	[Ar] 3d6 4s2	[Kr] 4d4 5s1	[Kr] 4d10 5s2 5p3	[Kr] 4d5 5s1
Formasi Entalpi (kJ/mol)	21	13,8	26,9	7,2	36
Konduktivitas Panas (W/m K)	22,7	80,2	53,7	66,6	138
Potensial Ionisasi (V)	6,84	7,87	6,88	7,34	7,10
Titik Lebur (K)	2128	1808	2742	505,12	2896
Bilangan Oksidasi	4	2,3,4,6	5,3	4,2	2,3,4,6
Kapasitas Panas (J/g K)	0,278	0,449	0,265	0,228	0,25
Entalpi Penguapan (kJ/mol)	590,5	349,5	690,1	290,4	590,4

Penambahan unsur molybdenum 0,3-1,3% berat kedalam paduan zirkonium akan menghasilkan sifat mekanik yang tinggi. Unsur Molybdenum yang dipadukan dengan unsur zirkonium akan menghaluskan butir, membentuk senyawa intermetalik dengan zirkonium ($ZrMo_2$)^[8].

Secara teoritis paduan zirkonium dapat dibuat dengan unsur-unsur golongan VA, VIA, dan VIIIA dalam tabel periodik (V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, Fe, dan Ni). Unsur-unsur tersebut dapat meningkatkan konsentrasi elektron dan sebagai akibatnya mengurangi konsentrasi kekosongan oksida anion, yang berarti pengurangan laju korosi. Diantara unsur-unsur tersebut Ta dan W mempunyai tampang lintang serapan neutron tinggi sehingga tidak layak untuk pemasu zirkonium. Unsur Ni meningkatkan tangkapan hidrogen (*hydrogen pick-up*) juga tidak cocok untuk pemasu zirkonium^[9].

Unsur Sn sebagai pemasu berguna untuk menekan gangguan korosi yang disebabkan oleh pengotor terutama unsur nitrogen sehingga meningkatkan ketahanan korosi. Unsur Sn mempunyai dampak yang baik jika dipadu bersamaan dengan unsur-unsur Fe, Cr, dan Ni. Jadi hanya Sn, Nb, Fe dan sedikit konsentrasi Cr, Ni, V, Cu dan Mo kemungkinan dapat ditambahkan sebagai pemasu zirkonium untuk mendapatkan ketahanan korosi pada temperatur tinggi dalam air atau uap.

Zirkonium dengan pemasu di atas dan dipadu dengan proses termomekanik dapat meningkatkan kekuatan mekanik dan *creep*. Hal tersebut dapat dicapai melalui unsur-unsur dengan kelarutan tinggi dalam α -Zr (Sn,O), sedangkan yang mempromosikan pengerasan presipitat adalah V dan Mo. Pengaruh unsur-unsur Fe, Cr, Ni, dan Cu pada fasa intermetalik dengan zirkonium.

Partikel fasa kedua (*Second Phase Particle/SPP*) komposisinya sebagai fungsi

nominal Nb dan temperatur aniling. Kandungan Nb naik dengan naiknya temperatur sedang kandungan Fe turun dengan naiknya temperatur. Pada temperatur aniling 550 °C terbentuk SPP (Zr,Nb)₄ Fe₂. Evaluasi fasa SPP sebagai fungsi kandungan nominal Nb dan Fe pada paduan zirkonium yang dianil 550 °C adalah sebagai berikut^[10]:

Tipe A : α -Zr + Zr (Nb,Fe)₂ + (Zr,Nb)₄ Fe₂

Tipe B : α -Zr + Zr (Nb,Fe)₂

Tipe C : α -Zr + Zr (Nb,Fe)₂ + β -Nb

Kelompok SPP terjadi didasarkan pada kesetimbangan termodinamik.

Penelitian paduan Zr-Sn-Nb-Fe sudah lama dilakukan antara lain sebagai berikut. Sintesa paduan Zr-Sn-Mo untuk mendapatkan bahan baru kelongsong elemen bakar nuklir. Hasil yang diperoleh adalah sebagai berikut: Pertama, ukuran butir paduan Zr-0,5%Sn-(0,5-1,0-1,5-2,0)%Mo yang dipanaskan pada 500 °C selama 4 jam naik dari 13,2 μ m menjadi 19,8 μ m untuk konsentrasi Mo 0,5% sampai 1,5% dan naik tajam menjadi 36,3 μ m pada konsentrasi Mo sebesar 2,0%. Kedua, kekerasan mikro paduan Zr-0,5%Sn-(0,5-1,0-1,5-2,0)%Mo yang dipanaskan pada 500 °C selama 4 jam naik dari 352,48 VHN menjadi 383,68 VHN untuk konsentrasi Mo 0,5% sampai 1,5% dan turun tajam menjadi 352,48 VHN pada konsentrasi Mo sebesar 2,0%^[4]. Karakterisasi ukuran kristalit, regangan mikro dan kekuatan luluh Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe dengan difraksi sinar-x. Berdasarkan jumlah puncak difraktogram maka aniling pada suhu 500 °C dan 700 °C baik untuk presipitasi atau randomisasi kristalit, sedangkan aniling pada suhu 600 °C dan 750 °C baik untuk pertumbuhan butir dan yang lebih spesifik aniling pada suhu 750 °C baik untuk reorientasi. Ukuran kristalit paling kecil dari hasil aniling 500 °C dan 700 °C sebesar 11,18Å, dan yang paling besar dari hasil aniling 750 °C sebesar 70,71 Å^[11]. Pengaruh

temperatur anil terhadap jenis dan ukuran presipitat fasa kedua pada paduan Zr-1%Nb-1%Sn-1%Fe. Ditemukan SPP Fe₂Nb, ZrSn₂FeSn, SnZr, NbSn₂, Zr_{0,68}Nb_{0,25}Fe_{0,08}, Fe₂Nb_{0,4}Zr_{0,6}, Fe₃₇Nb₉Zr₅₄, dan ω-Zr. Stabilisasi presipitat terjadi dengan baik pada temperatur anil 800 °C, pertumbuhan presipitat antara 500 °C sampai dengan 600 °C, dan minimisasi ukuran presipitat pada temperatur anil 700 °C^[12].

Dalam pelaksanaan uji korosi, luas permukaan sampel diperoleh dengan mengukur dimensi panjang, lebar, ketebalan, dan diameter lubang pada sampel. Hasil pengukuran tersebut dimasukkan ke persamaan berikut^[13]:

$$A = 2(pl+pt_e+lt_e) + 2\pi dt_e - 2\left(\frac{\pi d^2}{4}\right), \dots (1)$$

Dengan A adalah luas permukaan sampel (mm²), p adalah panjang sampel (mm), l adalah lebar sampel (mm), t_e adalah ketebalan sampel (mm), d adalah diameter lubang pada sampel (mm). Uji oksidasi dilaksanakan dalam *autoclave* berisi air bebas mineral pada temperatur 400 °C dengan tekanan 9,8-10 bar. Pertambahan berat karena pertumbuhan lapisan oksida dihitung dengan persamaan berikut:

$$\Delta W/A = \frac{(W_i - W_0)}{A} \dots \dots \dots (2)$$

TATA KERJA

Tahap awal dari penelitian adalah pembuatan sampel. Terlebih dahulu dipersiapkan bahan-bahan yang akan digunakan seperti zirkonium (Zr) dalam bentuk sponge dan serbuk, niobium (Nb) dalam bentuk serbuk, besi (Fe) dalam bentuk serbuk, timah (Sn) dalam bentuk *granule*, dan molibdenum (Mo) dalam bentuk serbuk. Sampel yang dibuat ada 4 macam yang setiap sampelnya memiliki berat 10 gram.

Dengan ΔW/A adalah pertambahan berat per satuan luas (g/mm²), W₀ adalah berat sampel sebelum uji korosi (g), W_i adalah berat sampel setelah uji korosi (g), A adalah luas permukaan sampel (dm²). Untuk perhitungan laju korosi dihitung dengan persamaan berikut :

$$Laju Korosi = \frac{(W_i - W_0)}{A} \times \frac{V}{W_0} \times \frac{t}{365} \dots \dots \dots (3)$$

Dengan A adalah Luas permukaan sampel (mm²), V adalah Volume sampel (mm³), W₀ adalah berat sampel sebelum uji korosi (g), W_i adalah berat sampel sesudah uji korosi (g) dan t adalah waktu penahanan saat uji korosi (hari). Satuan mm per year dikalikan dengan 0,0254 menjadi satuan *mills per year* (mpy).

Tujuan penelitian ini membuat paduan Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe-(x)%Mo dengan memvariasikan penambahan Mo pada berbagai komposisi. Membandingkan pengaruh kandungan Mo terhadap karakteristik logam paduan Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe meliputi mikrostruktur, homogenitas komposisi, kekuatan mekanik dan ketahanan korosi uap air. Menentukan kandungan Mo yang paling optimal pada paduan Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe-(x)%Mo untuk pembuatan kelongsong bahan bakar nuklir yang memiliki ketahanan korosi dan kekerasan yang tinggi.

Setelah menentukan komposisi kemudian tahapan yang dilakukan adalah penimbangan, dilakukan menggunakan Mettler Toledo dengan nilai skala terkecilnya 0,01 gram.

Tahap berikutnya adalah pencampuran atau *mixing*. Pencampuran dilakukan dengan cara manual yaitu dengan cara mencampurkan bahan ke dalam botol plastik kemudian di kocok hingga homogen. Pengepresan dilakukan menggunakan alat

press "HERZOG" dengan cara memberikan kompaksi atau penekanan pada sampel antara 300-400 kilo Newton.

Selanjutnya dilakukan peleburan menggunakan tungku busur listrik "CENTORR" atau alat khusus pelebur logam. Alat pelebur busur listrik terdiri dari *chamber*, krusibel tembaga, penggunaan atmosfer gas Argon. Pengulangan peleburan sebanyak 5 kali (*Remelting*) dan penggunaan air sebagai pendingin. Perlakuan panas dilakukan di dalam tungku (*chamber*) yang telah dialiri gas Argon. Tungku diatur temperaturnya pada posisi 750°C dan waktu penahanan pemanasan selama 3 jam.

Proses metalografi diawali dengan tahap pemotongan sampel, pemountingan, penggerindaan, pemolesan, pencucian dan pengetsaan sampel. Pemountingan (pembingkai) dilakukan menggunakan larutan *AcryFix Kit* yang terdiri dari *AcryFix* serbuk dan cair yang kemudian dicampurkan dengan perbandingan 2 : 1. Penggerindaan

dilakukan menggunakan alat gerinda dan ampelas dengan grid 320, 500, 800, 1000, 1200 dan 2400 mesh. Kecepatan mesin penggerinda diatur 300-400 rpm.

XRF merupakan metode analisis unsur-unsur yang terkandung dalam permukaan bahan yang dapat mewakili kandungan unsur dalam bahan dengan persyaratan utama adalah bahan yang dianalisis harus homogen.

Uji kekerasan menggunakan metode Vickers dengan bentuk indentor piramid. Metode Vickers sangat tepat untuk pengukuran kekerasan mikro. Pada pengukuran kekerasan dengan metode Vickers menggunakan beban yang bervariasi mulai dari 5 p hingga 2000 p.

Uji korosi dilakukan menggunakan *autoclave* pasivasi dengan tekanan 9,8 - 10 bar atau 10^6 - $9,8 \times 10^5$ Pa. Temperatur yang digunakan pada pengujian korosi adalah 400°C dengan variasi waktu penahanan selama 20 jam.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Ingot paduan Zr -1%Sn -1%Nb -1%Fe - (x)%Mo yang telah dilebur mengalami perubahan berat, hasil peleburan ditunjukkan pada Tabel 2. Untuk mengetahui karakteristik suatu material salah satunya dapat dilihat dari komposisi kimianya. Identifikasi komposisi unsur dilakukan dengan XRF (*X-Ray Fluorescence*). Hasil identifikasi komposisi paduan Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe-(x)%Mo ditunjukkan pada Tabel 3. Pengamatan mikrostruktur paduan Zr - 1%Sn - 1%Nb -1%Fe - (x)%Mo tanpa perlakuan panas dan setelah diberi perlakuan panas secara metalografi optik ditunjukkan pada Gambar 1, Gambar 2, Gambar 3, Gambar 4, Gambar 5, Gambar 6, Gambar 7, dan Gambar 8. Untuk pengukuran butir menggunakan metode intercept-Heyn (ASTM E 112-06) hasilnya ditunjukkan pada Gambar 9. Pengamatan sifat mekanik terhadap paduan

Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe-(x)%Mo dengan berbagai variasi penambahan Mo (molibdenum) dengan metode Vickers (ASTM E 384-08a) hasilnya diperlihatkan pada Gambar 10. Hasil analisis laju korosi paduan Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe-(x)%Mo menggunakan *autoclave* dengan variasi waktu penahanan ditunjukkan pada Gambar 11. Uji korosi menggunakan prosedur sesuai dengan ASTM G 2M-88.

1. Hasil peleburan

Peleburan dilakukan dengan teknik peleburan busur listrik. Karakteristik dasar dari peleburan busur listrik adalah penggunaan atmosfer gas Argon dengan kemurnian tinggi diharapkan peleburan sedikit mungkin menyerap gas pengotor dan menjaga agar busur tetap stabil. Selain itu *krusibel* yang terbuat dari tembaga yang didinginkan dengan air yang bertujuan agar logam dapat melebur tanpa terkotori oleh

krusibel. Tabel 2 menunjukkan berat masing-masing unsur dan berat sampel sebelum dan sesudah peleburan. Dari hasil peleburan didapatkan berat sampel paduan Zr – 1%Sn – 1%Nb – 1%Fe – (x)%Mo menurun. Hal ini disebabkan karena pada saat proses pengepresan terjadi kehilangan berat karena

terdapat unsur yang menempel pada *punch daise*. Selain itu juga ada sampel yang tidak bisa padat saat dipres sehingga banyak serpihan-serpihan yang hilang pada saat akan dilebur oleh sebab itu berat paduan Zr – 1%Sn – 1%Nb – 1%Fe – (x)%Mo berkurang.

Tabel 2. Berat unsur dan berat sampel sebelum dan sesudah dilebur

Variasi Mo (%)	Berat Zr (g)	Berat Fe (g)	Berat Nb (g)	Berat Sn (g)	Berat Mo (g)	Berat sebelum dilebur (g)	Berat sesudah dilebur (g)	ΔW (g)
0	9,7107	0,1	0,1002	0,1001	0	10	9,0407	0,9593
0,1	9,7007	0,1	0,1002	0,1001	0,0101	10	9,8124	0,1876
0,3	9,6806	0,1	0,1002	0,1001	0,0303	10	9,7260	0,2740
0,5	9,6606	0,1	0,1002	0,1001	0,0505	10	9,7327	0,2673

2. XRF (X-Ray Fluorescence)

Untuk mengetahui karakteristik suatu material salah satunya tergantung pada komposisi kimianya. Untuk mengetahui komposisi kimia dalam paduan Zr – 1%Sn – 1%Nb – 1%Fe – (x)%Mo menggunakan uji komposisi unsur berupa XRF (*X-Ray Fluorescence*). Pada metode XRF, atom-atom pada permukaan sampel akan ditumbuk oleh sinar-X yang berasal dari sumber sinar-X. Interaksi ini menyebabkan elektron dalam orbital kulit K akan terlempar dan terjadi kekosongan elektron pada kulit tersebut. Kekosongan elektron ini akan diisi oleh elektron dari orbital di atasnya dan perpindahan elektron ini diikuti dengan pelepasan sinar-X karakteristik sesuai dengan atom yang mengalami proses tersebut. Analisa kandungan unsur dalam bahan ditentukan atas dasar sinar-X karakteristik dari unsur yang dideteksi. Hasil pengujian komposisi unsur paduan Zr – 1%Sn – 1%Nb – 1%Fe – (x)%Mo menggunakan metode XRF ditunjukkan pada Tabel 3.

Pada komposisi paduan Zr – 1%Sn – 1%Nb – 1%Fe – (x)%Mo dengan variasi Mo 0% terdapat unsur Zr 93,76%, Fe 1,05%, Nb

0,77% dan Sn 3,5%. Selain itu juga terdapat unsur Al, Ni dan U, untuk unsur Mo tidak terdeteksi karena tidak mengalami penambahan Mo. Pada komposisi paduan Zr – 1%Sn – 1%Nb – 1%Fe – (x)%Mo dengan variasi Mo 0,1% terdapat unsur Zr 98,05%, Fe 0,34%, Nb 0,74% dan Mo 0,16%. Selain itu juga terdapat unsur Al dan Ni, untuk unsur Sn tidak terdeteksi karena komposisi Sn yang sangat kecil sehingga memungkinkan hilang ketika proses pengepresan. Pada komposisi paduan Zr – 1%Sn – 1%Nb – 1%Fe – (x)%Mo dengan variasi Mo 0,3% terdapat unsur Zr 95,37%, Fe 1,15%, Nb 0,79%, Sn 1,54% dan Mo 0,43%. Selain itu juga terdapat unsur Al. Pada komposisi paduan Zr – 1%Sn – 1%Nb – 1%Fe – (x)%Mo dengan variasi Mo 0,5% terdapat unsur Zr 94,98%, Fe 1,07%, Nb 0,84%, Sn 1,77% dan Mo 0,52%. Selain itu juga terdapat unsur Al, Ni dan U.

Unsur pengotor seperti Al, Ni dan U muncul dikarenakan berbagai sebab, salah satunya adalah pada saat proses pengepresan. Pada saat pengepresan *punch daise* atau wadah yang digunakan untuk mengepres tidak bersih sehingga banyak

unsur pengotor yang tercampur dalam paduan. Komposisi unsur pengotor sangat kecil sehingga tidak berpengaruh terhadap paduan setelah paduan tersebut diberi perlakuan termal. Untuk unsur pemadu yang komposisinya melebihi prosentase berat yang seharusnya, hal ini disebabkan karena pada saat menimbang sengaja diberi tambahan karena dikhawatirkan unsur pemadu akan hilang pada saat proses pengepresan karena komposisi unsur pemadu yang terlalu kecil.

Untuk unsur pemadu yang komposisinya berkurang dari berat yang seharusnya. Hal ini disebabkan karena pada saat proses pengepresan banyak unsur yang menempel pada *punch daise* serta banyak unsur yang menempel pada wadah pencampur sampel (*mixing*). Selain itu juga bisa disebabkan karena unsur tersebut telah menguap sebelum diproses. Zr – 1%Sn – 1%Nb – 1%Fe – (x)%Mo setelah diberi perlakuan panas cenderung mengecil.

Tabel 3. Prosentase komposisi berat unsur yang terdapat pada paduan Zirlo-Mo

Unsur	Mo 0 %	Mo 0,1 %	Mo 0,3 %	Mo 0,5 %
Al	0,8 %	0,7 %	0,72 %	0,72 %
Fe	1,05 %	0,34 %	1,15 %	1,07%
Ni	0,01 %	0,02 %	Nd	0,02 %
Zr	93,76 %	98,05 %	95,37 %	94,98 %
Nb	0,77 %	0,74 %	0,79 %	0,84 %
Mo	-	0,16 %	0,43 %	0,52 %
Sn	3,50 %	Nd	1,54 %	1,77 %
U	0,09 %	Nd	Nd	0,08 %

3. Mikrostruktur

Mikrostruktur paduan Zr – 1%Sn – 1%Nb – 1%Fe – (x)%Mo tanpa perlakuan panas ditunjukkan pada Gambar 1 sampai dengan Gambar 4 dan mikrostruktur paduan Zr – 1%Sn – 1%Nb – 1%Fe – (x)%Mo setelah diberi perlakuan panas ditunjukkan pada Gambar 5 sampai Gambar 8. Mikrostruktur paduan Zr – 1%Sn – 1%Nb – 1%Fe – (x)%Mo memperlihatkan bahwa struktur butiran paduan Zr – 1%Sn – 1%Nb – 1%Fe – (x)%Mo berbentuk lamelar. Mikrostruktur paduan Zr – 1%Sn – 1%Nb – 1%Fe – (x)%Mo tanpa perlakuan panas cenderung mengalami perubahan setelah mengalami perlakuan panas pada temperatur 750°C selama 3 jam. Ukuran butir paduan Zr–1%Sn–1%Nb–1%Fe–(x)%Mo setelah diberi perlakuan panas cenderung mengecil. Mikrostruktur paduan Zr–1%Sn–1%Nb–1%Fe–(x)%Mo tanpa perlakuan panas ditunjukkan pada Gambar 1

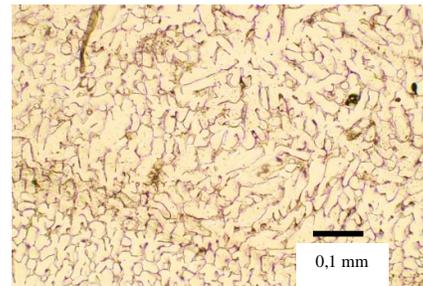
sampai dengan Gambar 4 dan mikrostruktur paduan Zr–1%Sn–1%Nb–1%Fe–(x)%Mo setelah diberi perlakuan panas ditunjukkan pada Gambar 5 sampai dengan Gambar 8. Sementara itu, pada Gambar 9 dapat dilihat bahwa ukuran butir paduan Paduan Zr – 1%Sn – 1%Nb – 1%Fe – 0%Mo tanpa perlakuan panas lebih besar dibandingkan dengan paduan Paduan Zr – 1%Sn – 1%Nb – 1%Fe – 0%Mo setelah perlakuan panas, begitu pula dengan paduan Zr–1%Sn–1%Nb–1%Fe–0,3%Mo. Hal ini dimungkinkan karena unsur Mo (molybdenum) dan niobium (Nb) yang dipadukan dengan unsur zirkonium memiliki kemampuan untuk memperhalus butiran sehingga pada saat paduan Zr–1%Sn–1%Nb–1%Fe–(x)%Mo dipanaskan pada temperatur 750°C ukuran butir menjadi kecil. Pada paduan Paduan Zr – 1%Sn – 1%Nb – 1%Fe – 0,5%Mo tanpa perlakuan panas lebih kecil

dibandingkan dengan paduan Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe-0,5%Mo setelah perlakuan panas. Hal ini karena pada paduan Paduan Zr - 1%Sn - 1%Nb - 1%Fe - 0,5%Mo setelah diberi perlakuan panas terjadi pertumbuhan butir sehingga ukuran butir yang dihasilkan semakin besar. Kemudian untuk paduan Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe-0,1%Mo belum terbentuk butir dan hanya terbentuk *dendrite*. Hal ini dikarenakan paduan Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe-0,1%Mo tidak atau belum homogen sehingga belum terbentuk butiran. Ukuran butir paduan Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe-(x)%Mo dihitung menggunakan metode *Linear Intercept-Heyn*,

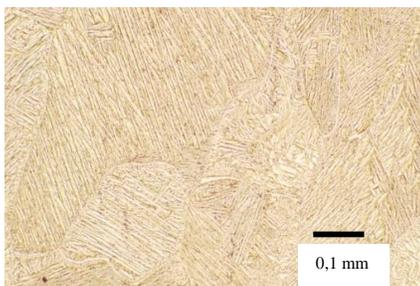
hasilnya ditunjukkan pada Gambar 9. Sudah dijelaskan pada pendahuluan bahwa konsentrasi pepadu Mo seiring dengan besarnya butir pada paduan zirkonium. Namun, pada konsentrasi tertentu dapat memperhalus butir. Sebagai contoh kandungan Mo 0,1 % sulit bereaksi. Pada konsentrasi tersebut terindikasi *dragging force* kelarutan padat dengan pembentukan fasa kedua seimbang. Pada konsentrasi Mo 0,3 % besar butir sebelum dan sesudah perlakuan panas sama, terlihat pada konsentrasi ini baik untuk pembentukan fasa kedua.



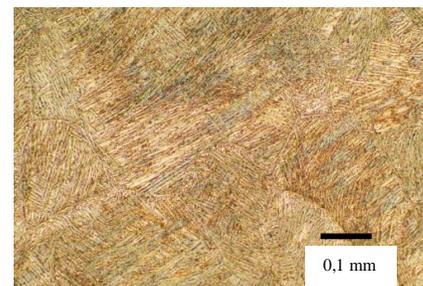
Gambar 1. Mikrostruktur paduan Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe-0%Mo non anil



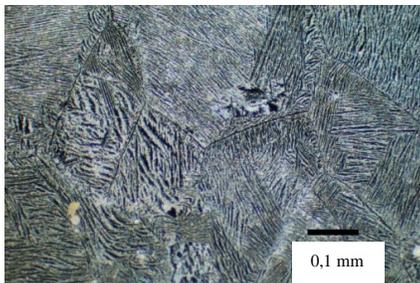
Gambar 2. Mikrostruktur paduan Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe-0,1%Mo non anil



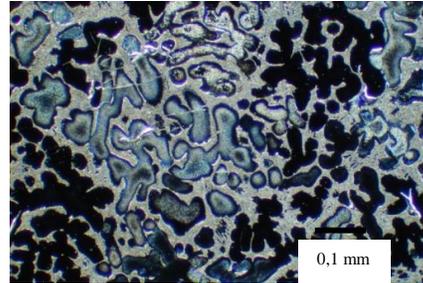
Gambar 3. Mikrostruktur paduan Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe-0,3%Mo non anil



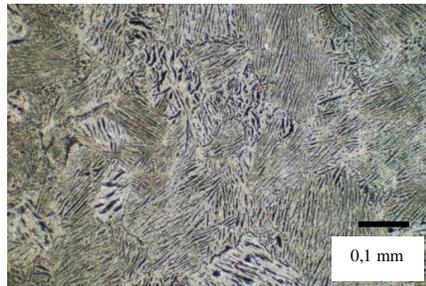
Gambar 4. Mikrostruktur paduan Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe-0,5%Mo non anil



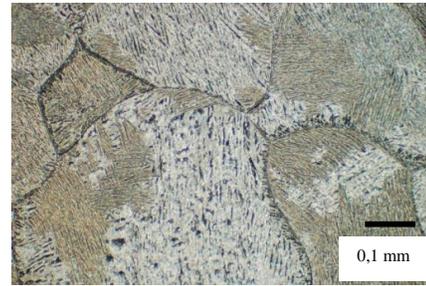
Gambar 5. Mikrostruktur paduan Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe-0%Mo hasil anil



Gambar 6. Mikrostruktur Paduan Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe-0,1%Mo hasil anil

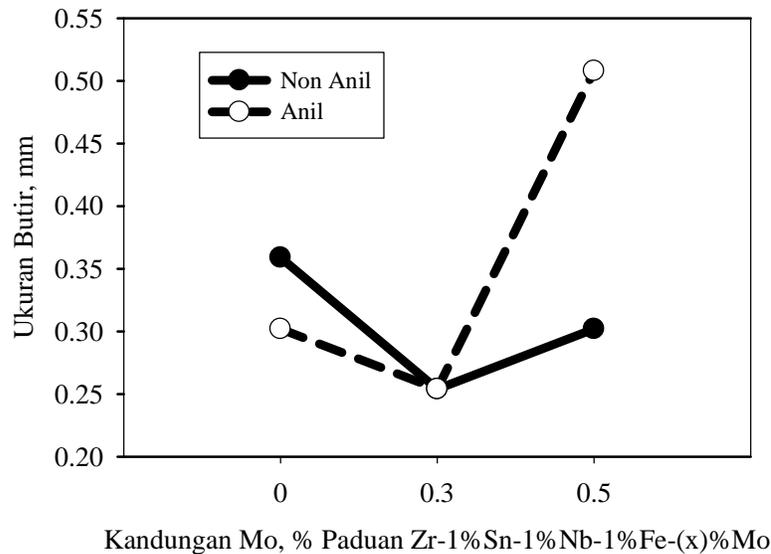


Gambar 7. Paduan Zr – 1%Sn – 1%Nb – 1%Fe – 0,3%Mo hasil anil



Gambar 8. Paduan Zr – 1%Sn – 1%Nb – 1%Fe – 0,5%Mo hasil anil

Kandungan Mo vs Ukuran Butir



Gambar 9. Korelasi kandungan Mo (%) dalam paduan Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe-(x)%Mo dengan ukuran butir (mm)

4. Kekerasan

Kekerasan merupakan ukuran ketahanan material terhadap deformasi tekan. Deformasi yang terjadi dapat berupa deformasi plastis. Pada permukaan dari dua komponen yang saling bersinggungan dan bergerak satu terhadap lainnya akan terjadi deformasi plastis. Deformasi plastis terjadi pada permukaan yang lebih keras. Efek deformasi tergantung pada kekerasan permukaan material. Pengamatan sifat mekanik kekerasan mikro paduan

Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe-(x)%Mo dengan berbagai variasi penambahan Mo (molibdenum) dilakukan dengan menggunakan metode Vickers. Nilai kekerasan Vickers dihitung menggunakan persamaan berikut :

$$HVN = \frac{2P \sin \frac{\theta}{2}}{D^2} \dots \dots \dots (4)$$

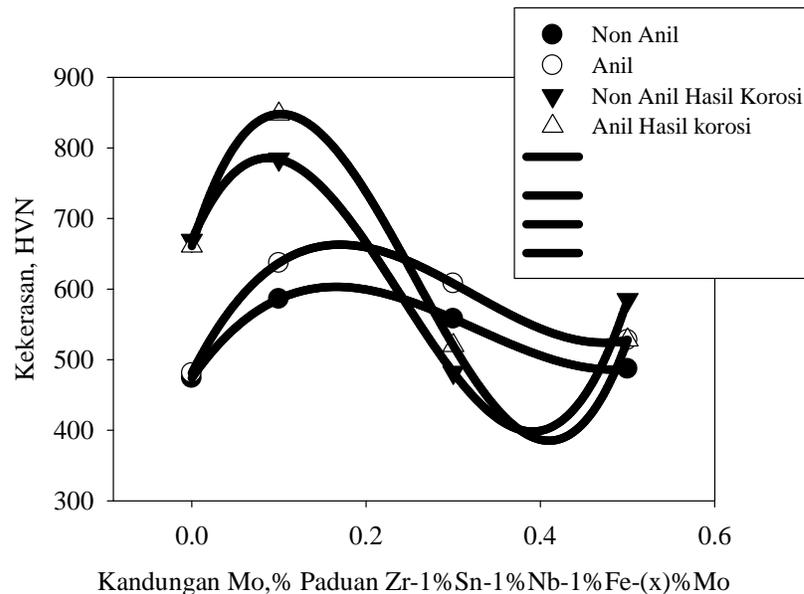
Dengan P adalah beban yang digunakan (kgf), D adalah diagonal penjejakan rata-rata (μm) dan θ adalah sudut piramid penjejakan (136°), hasil uji kekerasan mikro paduan Zr – 1%Sn – 1%Nb – 1%Fe – (x)%Mo tanpa perlakuan panas dan Zr – 1%Sn – 1%Nb – 1%Fe – (x)%Mo setelah diberi perlakuan panas diperlihatkan pada Gambar 10. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa nilai kekerasan paduan Zr – 1%Sn – 1%Nb – 1%Fe – (x)%Mo setelah pemanasan lebih tinggi dibandingkan paduan Zr – 1%Sn – 1%Nb – 1%Fe – (x)%Mo tanpa pemanasan. Peningkatan kekerasan paduan Zr–1%Sn–1%Nb–1%Fe–(x)%Mo setelah pemanasan disebabkan karena pada temperatur pemanasan 750°C terjadi pertumbuhan fasa kedua yang akan berdampak terhadap peningkatan kekerasan karena kehadiran fasa kedua tersebut berpotensi merintangai pergerakan dislokasi, serta membentuk senyawa intermetalik ZrMo_2 . Pada Gambar 10 menunjukkan nilai kekerasan paduan Zr – 1%Sn – 1%Nb – 1%Fe – (x)%Mo tanpa pemanasan dan setelah diberi pemanasan. Korelasi besar butir dengan kekerasan sesuai dengan hukum Hall Petch, bahwa ukuran butir berbanding terbalik dengan kekerasan. Pada konsentrasi Mo 0,1% belum terjadi reaksi dengan baik sehingga unsur Mo berada sebagai interstisi. Pada variasi Mo 0,3% dan 0,5% baik tanpa pemanasan maupun setelah pemanasan kekerasan mengalami penurunan dibanding dengan paduan Zr–1%Sn–1%Nb–1%Fe–0,1%Mo. Pada variasi penambahan Mo 0,1% kekerasannya mencapai nilai tertinggi sebesar 585,67 untuk paduan non anil dan 637 untuk paduan anil. Pada variasi Mo 0,3% hingga 0,5% kekerasannya menurun menjadi 486,67 untuk paduan non anil dan 528 untuk paduan anil. Berdasar diagram fasa Zr – 1%Sn – 1%Nb – 1%Fe – (x)%Mo, terdapat daerah $\alpha+\beta$ antara temperatur 600°C – 800°C disekitar konsentrasi Mo sebesar 0,18%. Kekerasan meningkat dengan naiknya konsentrasi Mo hingga

konsentrasi Mo sebesar 1,5% disebabkan karena terbentuknya ZrMo_2 . Kekerasan turun akibat kelarutan Mo dalam fasa α -Zr meningkat, sebagai akibatnya jumlah fasa kedua ZrMo_2 berkurang dan bahan berubah menjadi lunak. Selain itu, paduan Zr–1%Sn–1%Nb–1%Fe–0,1%Mo belum homogen, semakin homogen suatu paduan maka nilai kekerasannya akan semakin tinggi.

Ukuran butir sangat berhubungan dengan kekuatan suatu material. Semakin kecil ukuran butir dari sebuah material maka material tersebut akan semakin kuat. Terbukti bahwa ukuran butir paduan Zr – 1%Sn – 1%Nb – 1%Fe – (x)%Mo setelah pemanasan sebagian ada yang berukuran lebih kecil dibandingkan paduan Zr – 1%Sn – 1%Nb – 1%Fe – (x)%Mo tanpa pemanasan seperti tampak pada Gambar 1 sampai Gambar 4 dan Gambar 5 sampai Gambar 8. Hal ini membuktikan bahwa paduan Zr – 1%Sn – 1%Nb – 1%Fe – (x)%Mo setelah pemanasan lebih keras dibandingkan paduan Zr – 1%Sn – 1%Nb – 1%Fe – (x)%Mo tanpa pemanasan. Gambar 10 menunjukkan hasil pengukuran kekerasan paduan Zr – 1%Sn – 1%Nb – 1%Fe – (x)%Mo yang telah dikorosi selama 5 jam. Dari grafik diatas menunjukkan bahwa nilai kekerasan paduan Zr – 1%Sn – 1%Nb – 1%Fe – (x)%Mo tanpa perlakuan panas lebih tinggi dibandingkan dengan paduan Zr–1%Sn – 1%Nb – 1%Fe – (x)%Mo setelah perlakuan panas. Hal ini disebabkan oleh sisa-sisa deformasi akibat fabrikasi. Proses *annealing* mengurangi bahkan menghilangkan cacat titik dan dislokasi. Paduan Zr–1%Sn–1%Nb–1%Fe–(x)%Mo yang telah mengalami perlakuan panas belum terbebas dari tegangan sisa, cacat titik dan dislokasi hal ini menyebabkan kekerasan paduan Zr–1%Sn – 1%Nb – 1%Fe – (x)%Mo tanpa perlakuan panas lebih tinggi. Gambar 10 menunjukkan hasil pengukuran kekerasan paduan Zr – 1%Sn – 1%Nb – 1%Fe – (x)%Mo yang telah dikorosi selama 10 jam. Dari grafik diatas menunjukkan bahwa nilai kekerasan paduan Zr – 1%Sn – 1%Nb – 1%Fe – (x)%Mo tanpa perlakuan

panas tidak jauh berbeda dengan paduan setelah perlakuan panas. Hal ini disebabkan karena proses preparasi sampel yang kurang sempurna. Selain itu posisi penjejukan indentor yang kurang tepat, penjejukan yang paling akurat adalah pada bagian pinggir dari sampel yang telah dipreparasi. Dari Gambar 10 menunjukkan hasil bahwa semakin tebal lapisan oksida maka kekerasannya akan semakin turun karena material tersebut tidak tahan terhadap korosi sehingga mudah rapuh. Secara umum paduan Zr – 1%Sn – 1%Nb – 1%Fe – (x)%Mo tanpa pemanasan memiliki kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan paduan Zr – 1%Sn – 1%Nb – 1%Fe – (x)%Mo setelah pemanasan. Gambar 10 menunjukkan hasil pengukuran kekerasan paduan Zr – 1%Sn – 1%Nb – 1%Fe – (x)%Mo yang telah dikorosi selama 20 jam. Dari grafik

diatas menunjukkan bahwa nilai kekerasan paduan Zr – 1%Sn – 1%Nb – 1%Fe – (x)%Mo tanpa perlakuan panas tidak jauh berbeda dengan paduan Zr – 1%Sn – 1%Nb – 1%Fe – (x)%Mo setelah perlakuan panas. Hal ini disebabkan oleh berbagai faktor, diantaranya pada saat mengambil posisi penjejukan. *Indentor* tepat jatuh pada batas butir, kekerasan akan meningkat ketika posisi penjejukan pada batas butir. Hal ini disebabkan pada batas butir terdapat endapan unsur pemuad yang memiliki titik leleh rendah. Berdasarkan uraian di atas jelas bahwa kekerasan paduan Zr – 1%Sn – 1%Nb – 1%Fe – (x)%Mo dikendalikan oleh *flaw* atau dislokasi, interstisi unsur pemuad yang lebih keras, kelarutan padat unsur pemuad, dan terbentuknya fasa kedua $ZrMo_2$.



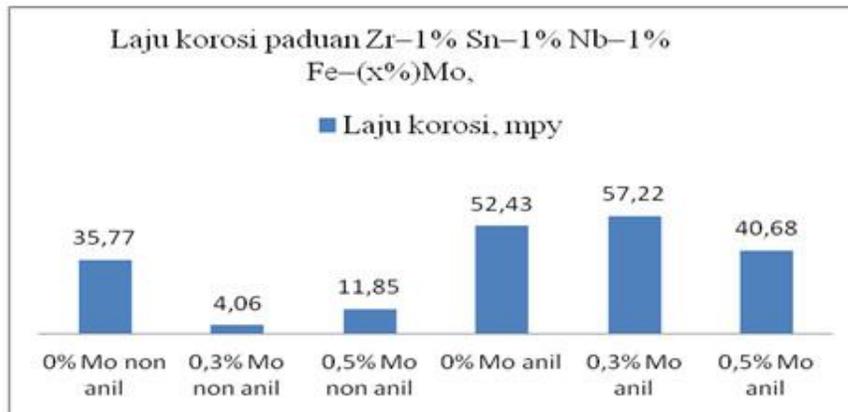
Gambar 10. Korelasi kandungan Mo(%) dalam paduan Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe-(x)%Mo dengan kekerasan (HVN).

Uji Korosi

Bila suatu material memiliki ketahanan korosi yang tinggi itu disebabkan oleh adanya pembentukan lapisan oksida stabil pada permukaannya. Lapisan oksida tersebut terbaharui dan selalu tumbuh secara perlahan-lahan pada suhu sekitar 300°C-400°C serta akan melekat kuat. Ketahanan korosi logam paduan Zirkonium tergantung pada sejumlah faktor yang diantaranya adalah konsentrasi, distribusi unsur-unsur pepadu dan pengotor, perlakuan seperti pengerolan, laju *quenching* dan suhu pemanasan. Berikut ini adalah hasil perhitungan $\Delta W/A$ per satuan waktu. Perlu diketahui bahwa perbedaan berat ini dihitung berdasarkan harga mutlaknya.

Gambar 11 menunjukkan hasil laju korosi paduan Zr – 1%Sn – 1%Nb – 1%Fe – (x)%Mo non anil. Pada paduan Zr–1%Sn–1%Nb–1%Fe–(x)%Mo dengan penambahan Mo 0,1% mengalami erosi. Hal ini dikarenakan terjadi pengurangan berat setelah paduan diuji korosi. Pengurangan berat paduan disebabkan karena sampel yang dikorosi patah, hal ini berarti paduan Zr–1%Sn–1%Nb–1%Fe–(x)%Mo dengan penambahan Mo 0,1% mudah rapuh atau *brittle* dan tidak tahan korosi. Pada paduan Zr–1%Sn–1%Nb–1%Fe–(x)%Mo dengan penambahan Mo 0%, 0,3% dan 0,5% laju korosi mengalami kenaikan. Hal ini disebabkan pada paduan Zr–1%Sn–1%Nb –1%Fe–(x)%Mo non anil masih terdapat

cacat-cacat atau dislokasi yang terdapat pada bahan. Cacat pada bahan berpengaruh terhadap ketahanan korosi bahan yaitu ketahanan korosi menurun. Apabila ketahanan korosi suatu bahan menurun maka laju korosinya akan semakin meningkat. Hasil laju korosi paduan Zr– 1%Sn – 1%Nb – 1%Fe – (x)%Mo yang mengalami anil diperlihatkan pula pada Gambar 11. Pada paduan Zr–1%Sn–1%Nb –1%Fe–(x)%Mo dengan penambahan Mo 0,1% laju korosi bernilai negatif. Hal ini disebabkan terjadi pengurangan berat setelah paduan diuji korosi. Pengurangan berat paduan karena sampel yang dikorosi patah. Hal ini berarti paduan Zr–1%Sn–1%Nb–1%Fe –(x)%Mo dengan penambahan Mo 0,1% tidak tahan terhadap korosi dan mudah rapuh atau *brittle*. Sudah ditunjukkan di atas pada konsentrasi Mo 0,1% belum terjadi reaksi sehingga masih banyak atom Mo yang bebas. Atom Mo yang bebas bereaksi dengan oksigen. Oksida Mo sifatnya mudah menguap. Laju korosi paduan Zr–1%Sn –1%Nb–1%Fe–(x)%Mo dengan penambahan Mo 0%, 0,3% dan 0,5% mengalami peningkatan. Hal ini berarti semakin bertambah kandungan Mo menyebabkan laju korosi semakin meningkat sehingga ketahanan korosi semakin menurun. Berdasarkan fakta ini jelas bahwa laju korosi paduan Zr–1%Sn–1%Nb–1%Fe –(x)%Mo dikendalikan oleh adanya fasa kedua ZrMo₂. Pembentukan ZrMo₂ perlu waktu pemanasan isothermal yang lama.



Gambar 11. Diagram laju korosi paduan Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe-(x)%Mo dalam air pada temperatur 400°C selama 20 jam

SIMPULAN

Pemadu Mo dapat memperhalus butir pada konsentrasi 0,1%–0,3% dan lebih besar dari pada konsentrasi itu dapat memperhalus butir. Kekerasan paduan Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe-(x)%Mo dikendalikan oleh *flaw* atau dislokasi, interstisi unsur pemadu yang lebih keras, kelarutan padat unsur pemadu, dan terbentuknya fasa kedua ZrMo₂. Laju korosi

paduan Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe-(x)%Mo dikendalikan oleh adanya fasa kedua ZrMo₂. Konsentrasi Mo 0,3 % pada paduan Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe-(x)%Mo ini paling baik untuk pembentukan fasa kedua. Konsentrasi antara Mo 0,3–0,5 % pada paduan Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe-(x)%Mo baik untuk pembentukan presipitat dan kelarutan padat.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. BENJAMIN, M.M.A (1983). Nuclear Reactor Materials and Application. America, UNR Company Inc.
- [2]. HARBOTTLE J.E. AND STRASSER A.A. (1994). Towards Failure-Free Fuel, Fuel Review 1994: Design, Nuclear Engineering International, p 28-30.
- [3]. SABOL, G.P., COMSTOCK, R.J., AND NAYAK, U.P. (2000). Effect of Dilute Alloys Adidtions of Molybdenum, Niobium, and Vanadium on Zirconium Corrosion. In Sabol, G.P. and Morn, G.D. Zirconium in the Nuclear Industry. Tweleth International Symposium , ASTM international, (p 525). West Conshohocken, PA
- [4]. SUGONDO, PRIBADI, S., KISWORO, J., SUSANTO, D.A.Y. (2005). Sintesis Paduan Zr-Sn-Mo Untuk Mendapatkan Bahan Baru Kelongsong Elemen Bakar Nuklir. Jurnal Teknologi Bahan Nuklir, 1(1), 1-14.
- [5]. BANERJEE S. (2011). Challenge in Materials Science for Advanced Nuclear Reactor. Advances in Nuclear materials. Mumbai, India.
- [6]. SERGENT, W. (1980). Table of Periodic Properties of Element. Illinois, Sergen-Welch Scientic Company.
- [7]. NIKULINA, A., SHISHOV, S., COX, B., GARZAROLLI, AND F. RUDLING, P. (2006). Manufacturing of Zr-Nb Alloys. Advanced Nuclear Technology International, (2-3). Sweden.
- [8]. BEN JAMIN, L. (1955). The Metallurgy of Zirconium. America, Mc Graw-Hill Book Company INC

-
- [9]. AMAEV, A.D., ANISIMOVA, J.A., NICULICINA, A.V., SAENKO, G.P., SEDOVA, A.V., AND FIVEESSKY, M.B. (1972). Corrosion Behavior of Zirconium Alloys in Boiling Water Under Irradiation . Proceeding of the 4th International Conference, United Nation, 10, (p 532). New York.
- [10]. TAFFALON, M.C., BARBERIS, P., BRACKET, J.C., MARDON, J.P., AND LEGRAS, L. (2005). Study of Nb and Fe Precipitation in α -phase Temperature range (400–550 °C in Zr–Nb–Fe–Sn Alloys. *Journal of ASTM International*, 2(4), 81–101.
- [11]. SUGONDO DAN FUTICHAH (2005). Karakterisasi Ukuran Kristalit, Regangan Mikro Dan Kekuatan Luluh Zr1%Sn1%Nb1%Fe Dengan Difraksi Sinar-X. *Jurnal Sains Materi Indonesia*. 6(2), 18–23.
- [12]. SUGONDO DAN ANDI CHAIDIR (2009). Pengaruh Temperatur Anil Terhadap Jenis Dan Ukuran Presipitat Fasa Kedua Pada Paduan Zr–1%Nb–1%Sn–1%Fe. *Jurnal Teknologi Bahan Nuklir*, 5(1), 21–29.
- [13]. ANONYMOUS, IAEA (1998). *Waterside Corrosion of Zirconium alloys in Nuclear Power Plants*, Australia