
ANALISIS MIKROSTRUKTUR DAN KEKERASAN INGOT Zr-1%Sn-(0,1%;1%)Fe-1%Nb-(x%)Mo DENGAN VARIASI Mo

Futichah, Heri Hardiyanti, Yatno D.A.S, Ganisa K Suryaman

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir – BATAN

Kawasan Puspiptek, Serpong, Tangerang Selatan, 15314

e-mail: futichah@batan.go.id

(Naskah diterima : 21-04-2014, Naskah disetujui: 27-05-2014)

ABSTRAK

ANALISIS MIKROSTRUKTUR DAN KEKERASAN INGOT Zr-1%Sn-(0,1%;1%)Fe-1%Nb-(x%)Mo DENGAN VARIASI Mo. Untuk memenuhi persyaratan derajat bakar yang tinggi dari elemen bakar maka harus diikuti peningkatan unjuk kerja kelongsong bahan bakar sehingga perlu dilakukan pengembangan material kelongsong berbasis Zr. Tujuan dalam penelitian ini adalah untuk mempelajari pengaruh penambahan Mo terhadap mikrostruktur dan kekerasan paduan Zr-1%Sn-(0,1%;1%)Fe-1%Nb-(x%)Mo. Analisis dilakukan pada sampel paduan Zr-1%Sn-0,1%Fe-1%Nb dan Zr-1%Sn-1%Fe-1%Nb serta kedua paduan yang masing-masing sudah ditambah dengan Mo dengan variasi antara 0,1% - 1,0%. Pengamatan mikrostruktur dengan alat mikroskop optik dan uji kekerasan menggunakan *Micro Vickers Hardness*. Hasil yang diperoleh pada penelitian ini adalah diameter butir paduan Zr-1%Sn-(0,1%)Fe-1%Nb-(x%)Mo terhadap perubahan komposisi Mo menunjukkan bahwa semakin tinggi kadar Mo menyebabkan penurunan diameter butir dan peningkatan kekerasan. Penambahan Mo diatas 0,3% peningkatan kekerasannya rendah dan cenderung stabil sehingga penambahan Mo diatas 0,3% kurang efektif. Pada paduan Zr-1%Sn-(1%)Fe-1%Nb-(x%)Mo, penambahan Mo yang paling efektif adalah maksimum 0,5%.

Kata kunci : mikrostruktur, kekerasan , kekuatan mekanik, paduan Zr-Sn-Fe-Nb.

ABSTRACT

MICROSTRUCTURE AND HARDNESS ANALYSIS OF Zr-1%Sn-(0,1%;1%)Fe-1%Nb-(x%)Mo INGOT WITH VARIATION OF Mo. To meet the requirements of high burnup of the fuel element, it must be followed by the increase performance of fuel cladding material. So , the development of Zr-based cladding materials should be done. The purpose of this research is to study the influence of Mo addition on the microstructure and hardness of Zr-1%Sn-(0,1%;1%)Fe-1%Nb-(x%)Mo alloy. Analyses were performed on Zr-1%Sn-0.1%Fe-1%Nb and Zr-1%Sn-1%Fe-1%Nb alloy. Mo was added to both of the samples with variations between 0, 1% - 1.0% and each sample was also analyzed. Microstructural observations were done using optical microscopy and hardness test using *Vickers Micro Hardness Tester*. The results of the experiment show that the grain diameter of Zr-1%Sn-(0.1%)Fe-1%Nb-(x%)Mo alloy is changing along with the changes of Mo composition. The more addition of Mo cause decrease in grain diameter and increase the alloy hardness. It is

also observed that the addition of Mo above average 0.3%, the increase in hardness is not significant and tend to be stable. The addition of Mo above 0.3% is not effective. As for the Zr-1%Sn-(1%)Fe-1%Nb-(x%)Mo alloy, the most effective amount of Mo addition is 0.5%.

Keywords: microstructure, hardness, mechanical strength, Zr-1%Sn-(0,1%;1%)Fe-1%Nb-(x%)Mo Alloy.

PENDAHULUAN

Kecenderungan perkembangan disain reaktor nuklir berpendingin air ringan (LWR) saat ini difokuskan pada peningkatan derajat bakar elemen bakar reaktor daya jenis PWR hingga menjadi 80 Gwd/t. Untuk memenuhi persyaratan derajat bakar yang tinggi dari elemen bakar maka harus diikuti peningkatan unjuk kerja kelongsong bahan bakar^[1], sehingga perlu dilakukan pengembangan material kelongsong berbasis Zr.

Beberapa pustaka menyebutkan upaya perbaikan sifat paduan melalui pengaturan komposisi paduan antara lain paduan biner ZrNb, Zr(Fe,Cr), paduan tersier Zr-Sn-(Fe,Cr), Zr-Nb(Fe,Cr), dan paduan kuaterner Zr-Sn-Nb(Fe,Cr)^[2,3]. Salah satu material berbasis Zr yang sudah ada saat ini adalah paduan Zr-Sn-Fe-Nb.^[4] Beberapa paduan sistem Zr-Sn-Fe-Nb yang sudah ada di pasaran yaitu paduan E 635 (*Russian alloy*) dan Zirlo (*Westinghouse*). Paduan Zirlo produk *Westinghouse Nuclear Fuel* ini sudah proven sebagai bahan kelongsong dan bahan struktur elemen bakar dengan kode/ nama bundel bahan bakar *Robust Fuel Assembly* (RFA-2). Dalam perkembangan selanjutnya, sistem paduan Zr-Sn-Fe-Nb ini perlu ditambahkan unsur logam Mo untuk lebih meningkatkan kekuatan mekaniknya.^[5,6] Kekuatan yang tinggi pada kelongsong sangat diperhatikan selain dibutuhkan pula karakteristik tahan terhadap korosi suhu tinggi. Peningkatan kekuatan mekanik dan ketahanan korosi suatu material paduan pada dasarnya adalah ditentukan oleh komposisi paduan dan proses fabrikasi^[7]. Maksud dari penambahan timah putih (Sn) pada paduan Zr-Sn-Fe-Nb adalah sebagai penguat,

penstabil fasa α dan mempermudah permesinan, sedangkan penambahan besi (Fe) dan niobium (Nb) adalah sebagai penguat dan penstabil fasa β ^[2,3,8]. Dalam pengembangannya unsur-unsur tersebut dipadu pula dengan unsur molibdenum (Mo) dengan maksud selain sebagai penguat dan penstabil fasa β juga untuk meningkatkan ketahanan korosi, penghalus dan distribusi butir^[6,9].

Pengaturan komposisi paduan, proses perlakuan mekanik dan termal terhadap paduan pada prinsipnya adalah upaya pengaturan mikrostruktur paduan sesuai dengan yang diinginkan sehingga menghasilkan paduan yang mempunyai unjuk kerja yang handal. Oleh karena itu, tujuan dalam penelitian ini adalah untuk mempelajari bagaimana pengaruh unsur logam Fe dan Mo terhadap mikrostruktur dan kekerasan paduan Zr-Sn-Fe-Nb. Data dari hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai data dukung penentuan komposisi optimum dari paduan Zr-Sn-Fe-Nb. Analisis dilakukan pada sampel paduan Zr-1%Sn-0,1%Fe-1%Nb dan Zr-1%Sn-1%Fe-1%Nb serta kedua paduan yang masing-masing sudah ditambah Mo dengan variasi antara 0,1% - 1,0%. Uji komposisi menggunakan AAS/XRF, analisis mikrostruktur menggunakan mikroskop optik, sedangkan uji kekerasan menggunakan *microhardness tester*.

TATA KERJA

Bahan dan alat

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah ingot paduan Zr-1%Sn-0,1%Fe-1%Nb dan

Zr-1%Sn-1%Fe-1%Nb yang ditambah Mo dengan variasi 0,1%-1,0%. Peralatan yang digunakan adalah neraca analitik "Mettler Toledo", mesin pencampur, mesin press "HERZOG", tungku lebur busur listrik "Centor", peralatan metalografi, mikroskop optik, *microhardness tester*, AAS dan XRF.

Cara kerja

Langkah awal dalam penelitian adalah pembuatan sampel ingot paduan Zr-Sn-Fe-Nb dan Zr-Sn-Fe-NbMo. Proses pembuatan sampel dimulai dengan penyiapan bahan yang akan digunakan yaitu zirkonium (Zr), niobium (Nb), silikon (Si), besi (Fe) dan Molibdenum (Mo) yang masing-masing dalam bentuk granul. Komposisi paduan adalah 1%Sn, 1%Nb dan 0,1% Fe serta Mo dengan variasi komposisi yaitu 0,1%, 0,3% dan 0,5%. Sampel ingot paduan Zr-Sn-Fe-Nb(Mo) yang dibuat terdiri dari 4 macam komposisi yang setiap sampelnya rata-rata memiliki berat 15 gram. Setelah penentuan komposisi kemudian dilakukan penimbangan dan dilanjutkan proses pencampuran dalam mesin pencampur. Tahap berikutnya adalah pengepresan yang dilakukan dengan menggunakan alat press "Herzog" dengan cara memberikan kompaksi atau penekanan pada sampel antara 300-400 kilo Newton. Pelet hasil pres selanjutnya diletakkan dalam krusibel tembaga untuk dilebur dalam tungku peleburan busur listrik. Arus listrik yang digunakan dalam peleburan adalah 150A dan dalam atmosfer gas Argon serta penggunaan air sebagai pendingin krusibel. Peleburan dilakukan berulang (*remelting*) sebanyak 5x. Ingot hasil *remelting* selanjutnya dilakukan penyiapan sampel metalografi yang diawali dengan pemotongan, pembungkaihan (*mounting*), pemberian label atau penandaan, penggerindaan, pemolesan, pencucian dan pengetsaan. Bahan untuk pembungkaihan adalah larutan AcryFix Kit yang terdiri dari AcryFix serbuk dan cair yang dicampur

dengan perbandingan 2:1. Penggerindaan dilakukan untuk menghaluskan permukaan sampel yang akan diamati mikrostrukturnya secara mekanik menggunakan kertas ampelas secara berurutan mulai dari grit 320, 500, 800, 1000, 1200 dan yang terakhir adalah grit 2400 dengan kecepatan putar 300-400 rpm. Sampel yang sudah siap, diambil gambarnya menggunakan mikroskop optik dan diuji kekerasan mikronya menggunakan *micro hardness tester*. Potongan sampel ingot yang lain disiapkan untuk uji komposisi kimia dengan menggunakan alat AAS/ XRF.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil peleburan

Ingot paduan Zr-Sn-Fe-Nb dan Zr-Sn-Fe-Nb-Mo hasil peleburan mengalami perubahan berat seperti ditunjukkan Tabel 1 yaitu untuk paduan dengan komposisi 0,1% Fe, sedangkan Tabel 2 untuk Fe 1,0% sebagai pembandingan. Dalam penelitian sebelumnya^[10] telah dibahas pula tentang paduan Zr-Sn-Fe-Nb-Mo dengan komposisi Zr-1%Sn-1%Fe-1%Nb-(x%)Mo dengan nilai (x) variabel penambahan Mo antara 0%Mo hingga 0,5%Mo. Oleh karena itu dalam penelitian ini dilanjutkan penambahan Mo hingga 1%. Dalam proses pembuatan ingot paduan Zr-Sn-Fe-NbMo, banyak sekali tahapan proses yang harus dilalui yaitu proses penyiapan bahan, penimbangan, pencampuran, pengepresan, peleburan dan pendinginan hasil. Dalam proses peleburan juga terdapat beberapa variabel yang memungkinkan berpengaruh terhadap penurunan atau peningkatan berat ingot yang dihasilkan. Proses peleburan menggunakan suasana gas inert (argon) serta menggunakan sistem pendingin untuk mendinginkan krusibel dalam tungku. Ketidak murnian gas Ar yang digunakan dalam proses peleburan, *flushing* udara dalam tungku kurang sempurna, cawan peleburan yang kotor atau terdapat sisa

kerak dari sisa peleburan sebelumnya, sistem pendingin krusibel yang tidak sempurna sehingga terjadi proses difusi dari material krusibel ke dalam material yang dilebur. Hal tersebut merupakan faktor-faktor yang memungkinkan berkontribusi terhadap terjadinya penambahan maupun pengurangan berat dari ingot yang dihasilkan. Indikasi dari kejadian tersebut dapat dilihat pada Tabel 1 dan 2. Pada Tabel 1 tampak bahwa berat ingot hasil peleburan cenderung meningkat dibanding dengan

bahan paduan sebelum dilebur, hal ini bisa disebabkan oleh terkontaminasinya bahan paduan dengan bahan lain saat penimbangan, pencampuran dan pengepresan. Disamping itu juga terkontaminasi udara dari gas inert argon yang tidak murni serta *torch* yang digunakan saat peleburan tidak terbebas dari kerak sisa peleburan sebelumnya. Pada Tabel 2, Ingot hasil peleburan mengalami hal yang sebaliknya yaitu seluruhnya terjadi pengurangan berat.

Tabel 1. Perbedaan berat sesudah dan sebelum peleburan Zr-1%Sn-0,1%Fe-1%Nb-(x%)Mo

No.	Unsur Logam		Berat sesudah peleburan (g)	Berat sebelum peleburan (g)	Berat sesudah dikurangi Berat sebelum peleburan (g)
	Mo (%)	Fe (%)			
1.	0	0,1	-	15,04530	-
2.	0,1	0,1	15,06610	15,05045	+ 0,01565
3.	0,3	0,1	15,12400	15,05075	+0,07325
4.	0,5	0,1	15,20960	15,05105	+0,15855
5.	0,7	0,1	14,90623	15,05130	-0,14507
6.	1	0,1	15,33040	15,05430	+0,27610

Tabel 2. Perbedaan berat sesudah dan sebelum peleburan Zr-1%Sn-1%Fe-1%Nb-(x%)Mo^[10]

No.	Unsur logam		Berat sesudah peleburan (g)	Berat sebelum peleburan (g)	Berat sesudah dikurangi Berat sebelum peleburan (g)
	Mo (%)	Fe (%)			
1.	0	1,0	9,04070	10,0000	-0,95930[10]
2.	0,1	1,0	9,81240	10,0000	-0,18760[10]
3.	0,3	1,0	9,72600	10,0000	-0,27400[10]
4.	0,5	1,0	9,73270	10,0000	-0,26730[10]
5.	0,7	1,0	14,8572	15,0533	-0,19610
6.	1	1,0	14,8764	15,0518	-0,17540

Komposisi kimia ingot paduan Zr-Sn-Fe-Nb-Mo

Komposisi kimia dari paduan sangat menentukan karakteristik yang lainnya seperti karakteristik fisik dan mekaniknya. Oleh karena itu sangat perlu untuk diketahui komposisi paduan ingot Zr-Sn-Fe-Nb-Mo yang telah dibuat. Untuk mengetahui komposisi kimia paduan dalam penelitian ini

digunakan dua alat yang saling melengkapi yaitu XRF (*X-ray fluorescence*) dan AAS (*atomic absorption spectrophotometry*) yang hasilnya dapat dilihat pada Tabel 3 dan 4. Salah satu unsur logam yang ditambahkan dalam paduan yakni timah putih (Sn) mempunyai titik leleh paling rendah diantara unsur logam pepadu yang lain seperti Zr,

Fe, Nb dan Mo yaitu 505,12°K. Dengan demikian unsur tersebut cenderung meleleh terlebih dahulu dan bahkan kemungkinan bisa menguap bila dibandingkan dengan unsur yang lain, sehingga keberadaannya sulit dideteksi. Dari hasil analisis komposisi pada Tabel 3 diketahui bahwa unsur Sn yang ditambahkan 1% pada paduan Zr-1%Sn-(0,1%)Fe-1%Nb-(x%)Mo tidak terdeteksi oleh XRF tetapi masih terdeteksi walaupun tidak sepenuhnya oleh AAS. Pada paduan Zr-1%Sn-(1%)Fe-1%Nb-(x%)Mo kandungan unsur Sn yang tinggi sehingga bisa terdeteksi XRF dengan baik (Tabel 4). Unsur Sn yang terdeteksi ini bisa berupa senyawa atau terikat dengan unsur lain dan dirinya sendiri (α -Sn).

Penambahan unsur Nb 1,0% pada kedua paduan terindikasi (Tabel 3 dan 4)

tidak banyak perubahan dari jumlah yang ditambahkan. Hal ini bisa disebabkan oleh karakteristik Nb yang mempunyai titik leleh 2742°K yang berarti lebih tinggi dari unsur padu yang lain selain Mo, sehingga memungkinkan tetap tidak lebur dan membentuk aglomerasi pada posisi tertentu. Jika unsur Nb melebur secara keseluruhan maka yang terdeteksi oleh XRF/AAS adalah Nb dalam bentuk senyawa atau berikatan dengan unsur paduan lainnya. Penambahan unsur Fe pada seluruh paduan pada Tabel 3 dan 4 tampak tidak banyak kehilangan Fe melainkan bertambah seperti pada paduan Zr-1%Sn-(1%)Fe-1%Nb-(x%)Mo di Tabel 4. Keberadaan Fe homogen pada seluruh paduan, dan terdeteksinya dapat berasal dari senyawa atau dirinya sendiri sebagai α -Fe.

Tabel 3. Prosentase komposisi berat unsur yang terdapat pada ingot Zr-1%Sn-(0,1%)Fe-1%Nb-(x%)Mo

Unsur	Mo 0%	Mo 0.1%	Mo 0.3%	Mo 0.5%	Alat
Al	0,0682	0,0790	0,0952	0,0461	AAS
Si	0,02711	0,4559	1,71	0,2025	AAS
Fe	0,0576	0,0986	0,0061	0,0048	AAS
Ni	0,0017	0,0042	0,0111	0,0106	AAS
Zr	84,62	84,76	87,14	78,93	XRF
Nb	0,85	0,85	0,96	0,82	XRF
Mo	0,0722	0,0044	0,01054	0,01784	AAS
Sn	0,5804	0,6106	0,0013	1,64	AAS
U	nd	nd	nd	nd	XRF

nd : *not detected*

Penambahan unsur Mo dalam paduan Zr-1%Sn-(0,1%)Fe-1%Nb-(x%)Mo hampir keseluruhannya (Tabel 3 dan 4) terdeteksi, bahkan yang seharusnya tidak terdeteksi (karena tidak ada penambahan Mo) juga muncul identifikasinya bahkan

lebih besar dari yang sengaja ditambah Mo seperti pada Tabel 3. Hal ini bisa disebabkan oleh proses penimbangan, pencampuran, pengepresan dan pemakaian krusibel, *torch* pada tungku lebur yang terkontaminasi Mo.

Tabel 4. Prosentase komposisi berat unsur yang terdapat pada ingot Zr-1%Sn-(1%)Fe-1%Nb-(x%)Mo^[10]

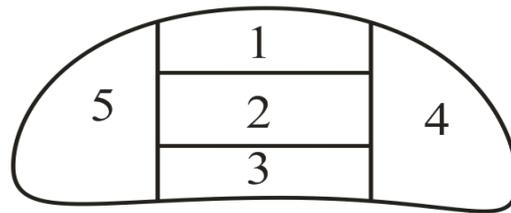
Unsur	Mo 0%	Mo 0.1%	Mo 0.3%	Mo 0.5%	Alat
Al	0.82%	0.70%	0.72%	0.72%	XRF
Si	nd	nd	nd	nd	XRF
Fe	1.05%	0.34%	1.15%	1.07%	XRF
Ni	0.01%	0.02%	nd	0.02%	XRF
Zr	93.76%	98.05%	95.37%	94.98%	XRF
Nb	0.77%	0.74%	0.79%	0.84%	XRF
Mo	nd	0.16%	0.43%	0.52%	XRF
Sn	3.50%	nd	1.54%	1.77%	XRF
U	0.09%	nd	nd	0.08%	XRF

nd : not detected

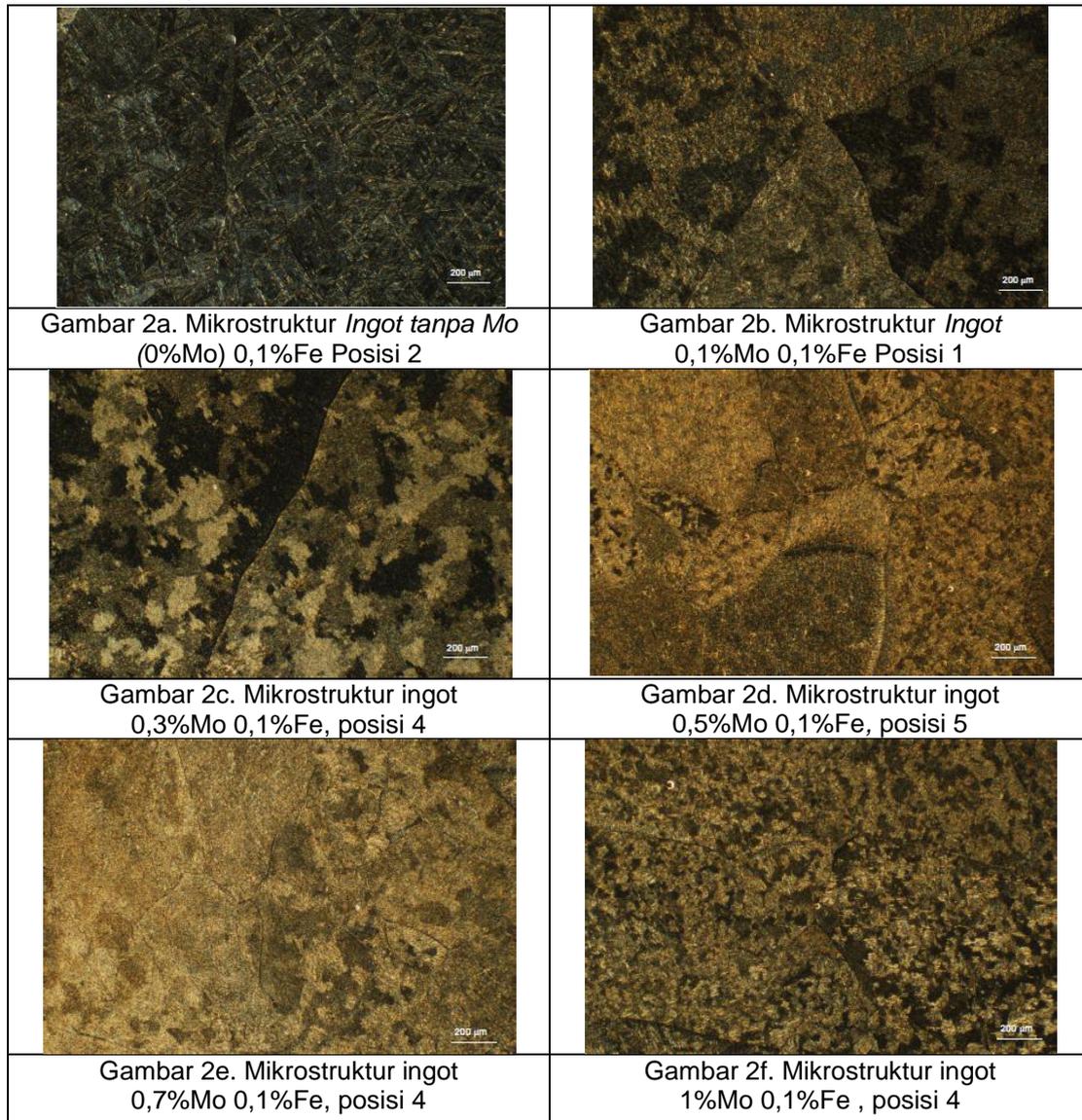
Mikrostruktur ingot paduan Zr-Sn-Fe-Nb-Mo

Mikrostruktur suatu paduan menentukan karakteristik mekaniknya. Ingot hasil peleburan mempunyai mikrostruktur yang berbeda pada setiap posisinya. Ukuran butir pada posisi tengah logam cor dijadikan patokan perbandingan antara ketiga sampel, karena dianggap memiliki kondisi pembentukan butir yang paling seragam dibandingkan bagian pinggir, atas atau bawah dari logam paduan hasil peleburan yang pendinginannya langsung terpengaruh oleh keadaan sekitarnya. Pengaturan posisi pengambilan gambar mikrostruktur dan uji kekerasan mikro pada paduan Zr-Sn-Fe-Nb-Mo dengan komposisi Zr-1%Sn-(0,1%)Fe-1%Nb-(x)Mo ditunjukkan pada Gambar 1. Pada penelitian ini pengambilan gambar mikrostruktur diambil pada semua posisi dan hasilnya dirata-rata dan dievaluasi. Gambar 2 menunjukkan bahwa mikrostruktur paduan Zr-1%Sn-(0,1%)Fe-1%Nb-(x)Mo cenderung berbutir besar karena proses pendinginan pada hasil peleburan dilakukan secara perlahan-lahan dan belum mengalami perlakuan mekanik maupun termal. Sebagian besar mikrostrukturnya berbentuk *Widmanstätten* atau disebut juga struktur *Thomson*^[11] yaitu pola mikrostruktur berupa

anyaman yang disebut *lamellar*, hal ini tampak jelas pada Gambar 2.a. Struktur ini membentuk susunan paduan yang cenderung kekuatan mekaniknya tinggi. Pada Gambar 2.b sampai dengan 2.f struktur *Widmanstätten*-nya semakin halus pada masing-masing butir. Perubahan ukuran diameter butir yang semakin halus ditandai oleh banyaknya batas butir yang terbentuk seperti tampak pada Gambar 2.d sampai dengan 2.f. Ukuran diameter butir dihitung berdasarkan hasil foto mikrostruktur paduan menggunakan metode *Linear Intercept Heyn* (ASTM E 112-96(2004)) dengan garis uji standar sepanjang 500 mm. Gambar 3 menunjukkan grafik korelasi perubahan diameter butir rata-rata terhadap perubahan kandungan Mo dalam paduan Zr-1%Sn-(0,1%)Fe-1%Nb-(x)Mo. Tampak bahwa persen kandungan Mo berpengaruh terhadap mikrostruktur atau diameter butir paduan. Pembentukan butir berhubungan dengan reaksi solidifikasi saat proses pembekuan terjadi. Selama proses peleburan unsur pertama yang melebur adalah Sn (505,12°K) dilanjutkan Fe (1808°K), Zr (2128°K), Nb (2742°K) dan yang terakhir adalah Mo (2896°K). Begitu pula saat pendinginan, unsur yang pertama kali mengeras adalah timah putih, lalu besi, kemudian zirkonium, niobium dan terakhir adalah molybdenum.



Gambar 1. Skema posisi pengambilan gambar ingot paduan Zr-1%Sn-(0,1%;1%)Fe-1%Nb-(x%)Mo untuk pembesaran 50 x dan uji kekerasan mikro



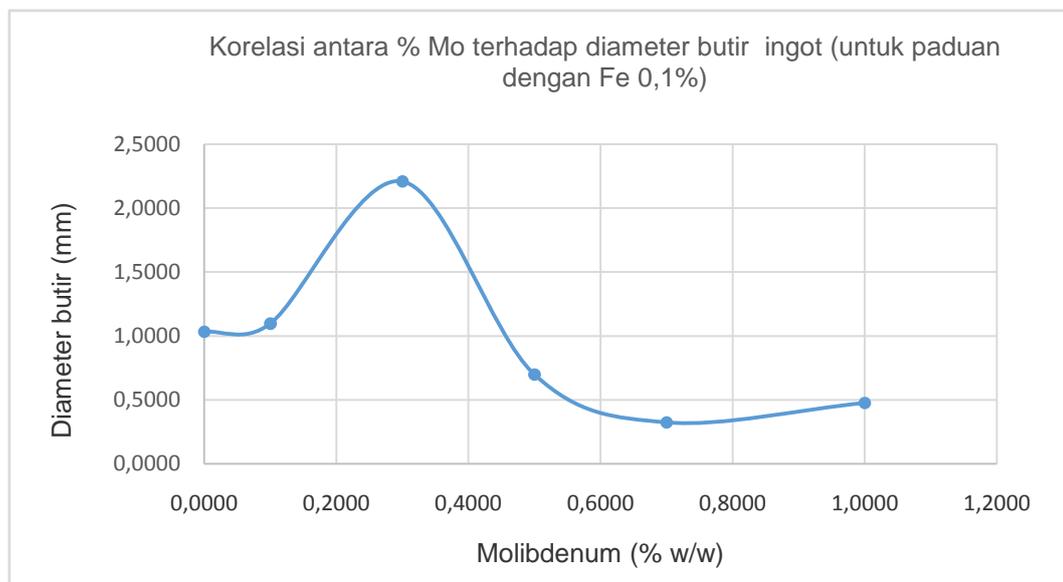
Gambar 2. Struktur mikro ingot paduan Zr-1%Sn-(0,1%)Fe-1%Nb-(x%)Mo dalam berbagai komposisi penambahan unsur logam Mo

Unsur Sn dalam paduan membentuk senyawa larut padat dan sedikit senyawa fasa kedua yang berperan menghalangi proses pertumbuhan butir. Pada kadar unsur Sn terendah dari hasil

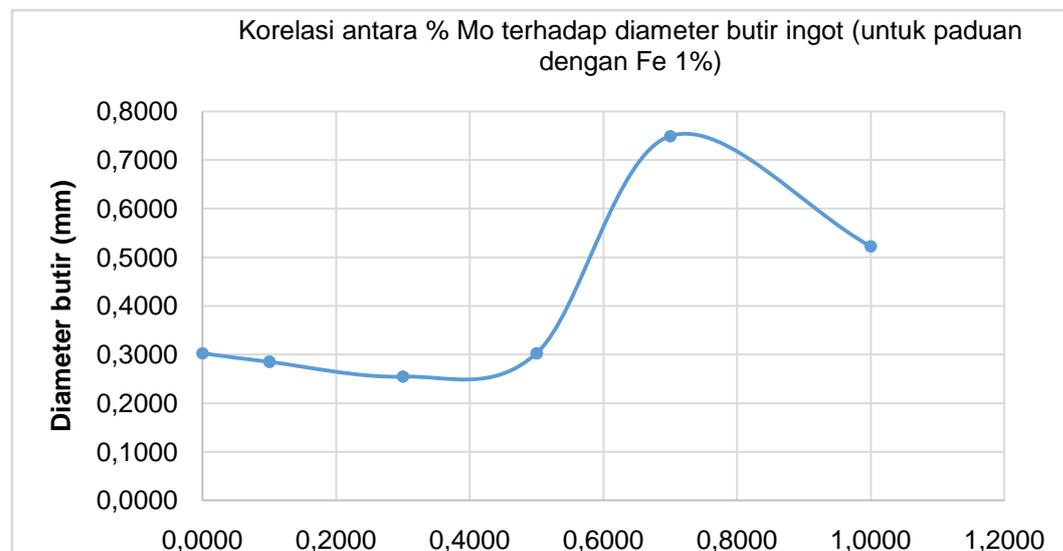
analisis komposisi paduan Zr-1%Sn-(0,1%)Fe-1%Nb-(x)Mo (Tabel 3) menghasilkan ukuran butir paduan paling besar yaitu sekitar 2,25 mm atau 2.250 µm seperti yang terlihat dalam Gambar 3. Hal ini

menunjukkan bahwa unsur Sn dalam jumlah kecil, tidak mampu menghalangi proses pertumbuhan butir sehingga butir yang teridentifikasi berukuran besar. Terjadinya reaksi padat-padat juga berhubungan dengan tingkat reaktivitas unsur, sehingga menentukan jenis senyawa fasa kedua yang terbentuk. Fasa kedua inilah yang berperan dalam menghambat pertumbuhan butir selama pendinginan dan pertumbuhan butir, sehingga logam murni berbutir lebih besar dibanding dengan logam paduan dalam kondisi perlakuan termal yang sama. Oleh karena itu penambahan Mo lebih tinggi dalam paduan Zr-1%Sn-(0,1%)Fe-1%Nb-(x)Mo mengakibatkan diameter butir

semakin halus dan tentu saja kekuatan mekanik yaitu kekerasan mikro semakin meningkat. Pada Gambar 4 menggambarkan grafik korelasi perubahan diameter butir rata-rata terhadap perubahan kandungan Mo dalam paduan Zr-1%Sn-(1%)Fe-1%Nb-(x)Mo. Pada paduan dengan kandungan 1%Fe, penambahan Mo sampai dengan 0,5% masih menunjukkan perubahan diameter butir tidak terlalu tinggi yakni dalam kisaran 0,25 mm (250 μ m) hingga 0,3 mm (300 μ m), tetapi setelah melewati penambahan 0,5%Mo terjadi perubahan ukuran butir meningkat tajam hingga di atas 0,5 mm (500 μ m).



Gambar 3. Hubungan antara komposisi penambahan Mo (%) terhadap diameter butir (mm) paduan Zr-1%Sn-(0,1%)Fe-1%Nb-(x%)Mo.

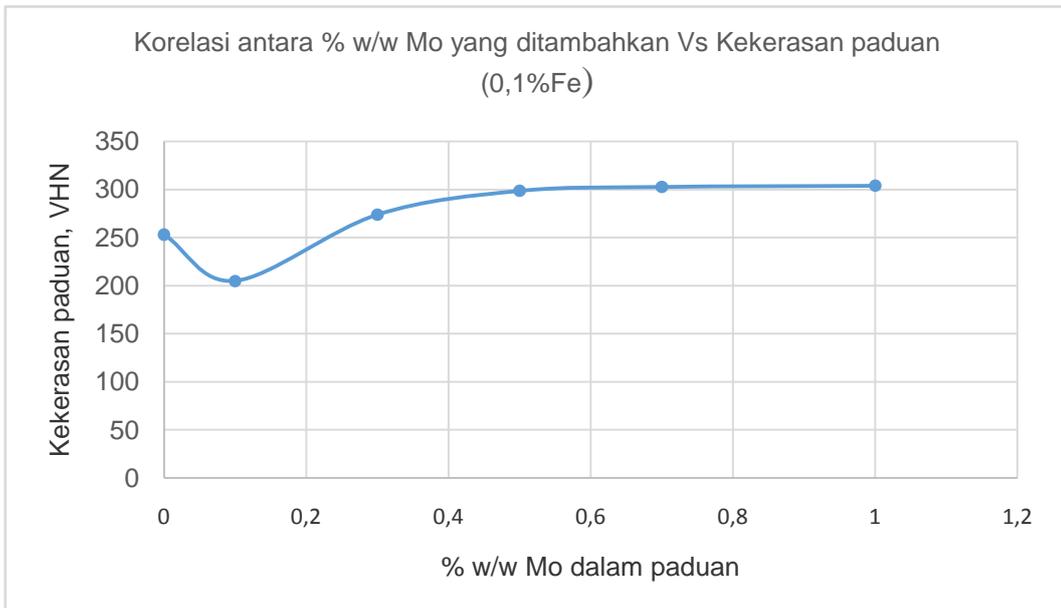


Gambar 4. Hubungan antara komposisi penambahan Mo (%) terhadap diameter butir (mm) paduan Zr-1%Sn-(1%)Fe-1%Nb-(x%)Mo.

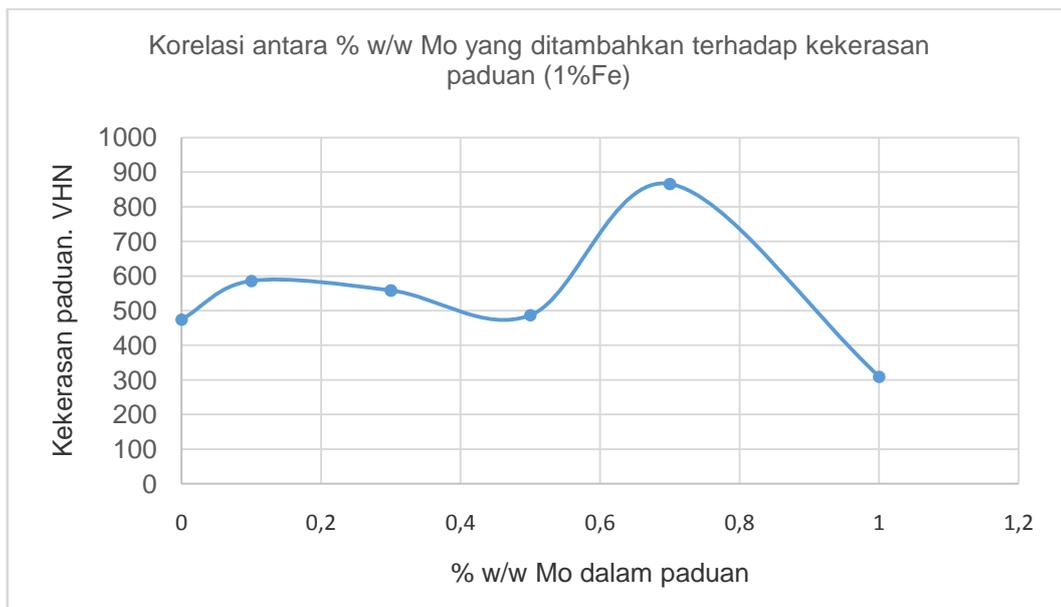
Kekerasan ingot paduan Zr-Sn-Fe-Nb-Mo

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. Diameter butir paduan, terkait erat dengan ukuran kekerasan paduan. Secara teori, kekerasan material berbanding lurus dengan kekuatan luluh^[7], sedangkan kekuatan luluh berbanding terbalik dengan ukuran butir sesuai persamaan Hall Petch^[7], sehingga dapat dikatakan bahwa kekerasan berbanding terbalik dengan ukuran diameter butir. Hal ini dikarenakan semakin halus kecil ukuran butir mengakibatkan adanya batas butir yang semakin banyak sehingga semakin memperbesar peranannya terhadap penghambatan pergerakan dislokasi karena

batas butir merupakan rintangan terhadap gerakan dislokasi^[7]. Pengamatan sifat mekanik kekerasan mikro paduan Zr-1%Sn-(0,1%&1%)Fe-1%Nb-(x%)Mo dengan berbagai variasi kadar Mo dilakukan dengan menggunakan metode Vickers. Dari Gambar 5 menunjukkan hubungan antara komposisi penambahan Mo terhadap kekerasan paduan Zr-1%Sn-(0,1%)Fe-1%Nb-(x%)Mo. Penambahan Mo cenderung meningkatkan kekerasan dan maksimum yang bisa dicapai adalah 0,3%Mo. Penambahan Mo lebih dari 0,3% menunjukkan pertambahan kekerasan yang tidak terlalu tinggi yaitu dalam kisaran 275 VHN hingga 300 VHN. Untuk paduan Zr-1%Sn-(1%)Fe-1%Nb-(x%)Mo, penambahan Mo hingga 0,5% tidak terlalu tinggi dan cenderung stabil yaitu antara 500 VHN hingga 580 VHN, sedangkan diatas 0,5% terjadi perubahan yang fluktuatif dalam kisaran 860 VHN hingga 300 VHN hal ini terlihat pada Gambar 6.



Gambar 5. Hubungan antara komposisi penambahan Mo (%) terhadap kekerasan paduan Zr-1%Sn-(0,1%)Fe-1%Nb-(x%)Mo



Gambar 6. Hubungan antara komposisi penambahan Mo (%) terhadap kekerasan paduan Zr-1%Sn-(1%)Fe-1%Nb-(x%)Mo

SIMPULAN

Mikrostruktur paduan Zr-1%Sn-(0,1%)Fe-1%Nb-(x%)Mo berbentuk *Widmanstatten*. Perubahan struktur *Widmanstatten* dan ukuran diameter butir semakin halus seiring dengan

peningkatan penambahan Mo ke dalam paduan, hal ini ditandai oleh banyaknya batas butir yang terbentuk pada paduan. Diameter butir paduan Zr-1%Sn-(0,1%)Fe-1%Nb-(x%)Mo terhadap perubahan komposisi Mo menunjukkan bahwa semakin tinggi kadar Mo

menyebabkan terjadi penurunan diameter butir dan peningkatan kekerasan. Penambahan Mo lebih dari 0,3% terjadi peningkatan kekerasan rata-rata tidak tinggi dan cenderung stabil yaitu dalam kisaran 275 VHN hingga 300 VHN, sehingga penambahan Mo diatas 0,3% kurang efektif. Untuk paduan Zr-1%Sn-(1%)Fe-1%Nb-(x%)Mo penambahan Mo yang paling efektif adalah maksimum 0,5%.

UCAPAN TERIMAKASIH

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada seluruh anggota Kelompok Litbang Zirlo-Mo, mahasiswa praktek kerja lapangan Luckito Andhi Nugroho dan Octa Miadi yang telah bekerja sama dan saling bahu membahu untuk membantu mencapai sasaran akhir penelitian, sehingga penelitian "Pembuatan Prototipe Ingot Paduan Zirlo-Mo" dapat diselesaikan dan makalah penelitian ini dapat dibuat.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Anon, (1990). *Fuel Design High Burnup Offers Attractive Possibilities, Nuclear Engeneering International* (Incorporates Nuclear Power) 35 (428).
- [2] Cezus, (1997). *Zirconium-Titanium-Magnesium-Tantalum-Hafnium*, Specialty Metals Meeting the High-Tech Industries Challenge.
- [3] Van Swam.L.F, Garzarolli.F, Steinberg.E, (2003). *Advanced PWR Cladding*.
- [4] Anonymous, (2004). Westinghouse RFA-2 Design, Westinghouse Electric Company, Box 355, Pittsburgh, PA 15230, November 2004.
- [5] Y.B.Chun, S.K.Hwang, M.H.Kim, S.I.Kwun, Y.S.Kim, (1999). *Effect of Mo on Recrystallization Characteristics of Zr-Nb-(Sn)-Mo Experimental Alloys*. Journal of Nuclear Materials 265, page 28 – 37.
- [6] J.H.Lee, S.K.Hwang,(2003). *Effect of Mo Addition on The Corrosion Resistance of Zr-based Alloy in Water Containing LiOH*, Journal of Nuclear Materials 321, pp.238-248.
- [7] Benjamin.M.Ma, (1983). *Nuclear Reactor Materials and Application*, VNR Company Inc., New York, page.1-60.
- [8] Raul.B.R, (2008). *Materials Issues for Advanced Nuclear System*, Published on line, 12 Januari 2008.
- [9] Y.B.Chun, S.K.Hwang, S.I Kwun And M.H Kim, (1999). *Abnormal Grain Growth of Zr-1%Nb Alloy and the Effect of Mo Addition*, Scripta Materialia, Vol.40 No.10 pp.1165-1170.
- [10] Sugondo, (2011). Pengaruh pepadu Mo pada kekuatan mekanik dan ketahanan korosi paduan Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe, Jurnal ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir URANIA, vol.17 No.3, Oktober 2011, hal.116-130
- [11] http://en.wikipedia.org/wiki/Widmanstatten_pattern (2014)