

SINTESIS PADUAN Zr-Sn-Mo UNTUK MENDAPATKAN BAHAN BARU KELONGSONG ELEMEN BAKAR NUKLIR

Sugondo, Slamet Pribadi, Djoko Kisworo, Yatno D.A. Susanto
Pusbangtek Bahan Bakar Nuklir dan Daur Ulang – BATAN, Serpong

ABSTRAK

SINTESIS PADUAN Zr-Sn-Mo UNTUK MENDAPATKAN BAHAN BARU KELONGSONG ELEMEN BAKAR NUKLIR. Penelitian ini bertujuan mendapatkan paduan baru zirkaloi untuk kelongsong elemen bakar nuklir. Sedangkan sasaran penelitian ialah untuk memperoleh data sintesis peleburan Zr-0,5%Sn-(0,5;1,0;1,5;2,0)%Mo, berupa komposisi kimia, perlakuan panas, mikrostruktur dan kekerasan. Sampel paduan Zr-Sn-Mo dengan variabel konsentrasi unsur Mo dengan komposisi Zr-0,5%Sn-(0,5;1,0;1,5;2,0)%Mo, dibuat dengan teknologi serbuk dan dilebur dalam tungku busur listrik tunggal. Setelah perlakuan pendinginan cepat (*quenching*), sampel dipotong dengan pisau intan (*diamond blade*) dengan ukuran 5×2×10 mm. Selanjutnya sampel dianil pada temperatur 500°C, 600°C, 700°C dan 750°C selama 4 jam. Uji metalografi dilakukan dengan mikroskop optik, dan uji kekerasan dengan uji kekerasan mikro Vickers. 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 µm menjadi 19,8 µm untuk konsentrasi Mo 0,5% sampai 1,5%, dan meningkat tajam menjadi 36,3 µm 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%. Ketiga, secara umum kekerasan mikro turun dengan naiknya temperatur pemanasan dan mempunyai harga maksimum pada konsentrasi Mo sebesar 1,5%.

KATA KUNCI: Paduan Zr-Sn-Mo, Kelongsong elemen bakar nuklir, Mikrostruktur, Ukuran butir

ABSTRACT

SYNTHESIZING OF Zr-Sn-Mo ALLOYS TO OBTAIN NEW MATERIAL FOR NUCLEAR FUEL ELEMENT CLADDING. The objective of this research is to obtain a new zirconium alloy for nuclear fuel element cladding. The target of this research is to acquire data on melting synthesizing of Zr-0.5wt%Sn-(0.5;1.0;1.5;2.0)wt%Mo, which include chemical composition, heat treatment, microstructure and hardness. Samples of Zr-Sn-Mo with concentration of Mo as variable in weight percent (wt%) with a composition of Zr-0.5wt%Sn-(0.5;1.0;1.5;2.0)wt%Mo, were prepared using powder technology, and melting was performed in a single arc furnace. After quenching, the samples were cut using a diamond blade to obtain a size of 5×2×10 mm. The samples were subsequently annealed at 500°C, 600°C, 700°C and 750°C for 4 hours. The metallography was examined using optical microscope and the hardness was tested using Vickers microhardness. The results are as follows. First, the grain sizes of Zr-0.5wt%Sn-(0.5;1.0;1.5;2.0)wt%Mo which were heated at 500°C for 4 hours increase from 13.2 µm to 19.8 µm for 0.5wt%Mo to 1.5wt%Mo and escalate to 36.3 µm at 2.0wt%Mo. Second, the microhardness of Zr-0.5wt%Sn-(0.5;1.0;1.5;2.0)wt%Mo which were heated at 500°C for 4 hours increases from 352.48 VHN to 383.68 VHN for 0.5wt%Mo to 1.5wt%Mo and

decreases sharply to 352.48 VHN at 2.0wt%Mo. Third, in general the microhardness decreases with increasing heat treatment temperature and has a maximum value at 1.5wt%Mo.

FREE TERMS: Zr-Sn-Mo alloy, Nuclear fuel element cladding, Microstructure, Grain size

I. PENDAHULUAN

Efisiensi daya reaktor air bertekanan (PWR) perlu dinaikkan, salah satunya dengan peningkatan temperatur operasi menjadi 400-600°C^[1]. Temperatur operasi ini memerlukan pengembangan bahan kelongsong baru sebab Zircaloy-4 yang digunakan saat ini mempunyai keterbatasan pada kondisi operasi PWR, yakni pada temperatur 326-330°C dengan fluks panas sekitar 60 W/cm² dan derajat bakar 60 GWd/MTU^[2].

Salah satu paduan yang tahan korosi pada kisaran temperatur 400-600°C adalah paduan biner Zr-Mo. Paduan Zr-0,3Mo mengalami penambahan berat 255 mg/dm² pada temperatur 500°C selama 1850 jam^[3], sedangkan Zircaloy-2 dan Zircaloy-4 tidak mampu dioperasikan pada temperatur 500°C. Dilaporkan juga bahwa paduan Zr-0,5%Mo mengalami penambahan berat 60 mg/dm² setelah dikorosi selama 1000 jam pada temperatur 300°C dan tekanan 85 atm^[4].

Penambahan unsur pepadu timah (Sn) dimaksudkan untuk meningkatkan kekuatan paduan zirkaloi^[5], meski dapat mengurangi ketahanan korosi. Zr-0,51%Sn mengalami penambahan berat 197 mg/dm² setelah dikorosi selama 270 jam, sedangkan Zircaloy-2 mengalami penambahan berat 30 mg/dm²^[6]. (Komposisi pepadu Zircaloy-2 adalah 1,2-1,7%Sn; 0,07-0,2%Fe; 0,05-0,15%Cr; dan 0,03-0,08%Ni). Zircaloy-4 yang dikorosi selama 1100 jam pada 400°C mengalami penambahan berat 100 mg/dm²^[7]. (Komposisi pepadu Zircaloy-4 adalah 1,2-1,7%Sn; 0,12-0,18%Fe; 0,05-0,15%Cr; dan <0,007%Ni).

Berdasarkan uraian di atas, penelitian ini bertujuan mendapatkan paduan baru zirkaloi sebagai kelongsong elemen bakar nuklir. Sedangkan sasaran penelitian adalah untuk mendapatkan data sintesis peleburan Zr-0,5%Sn-(0,5;1,0;1,5;2,0)%Mo, berupa komposisi kimia, perlakuan panas, mikrostruktur dan kekerasan.

II. TEORI

2.1 Pemilihan Unsur Pepadu

Salah satu syarat pemilihan pepadu zirkaloi ialah serapan neutronnya rendah. Unsur molibdenum (Mo) mempunyai serapan neutron 2,5 barn dan timah (Sn) 0,6 barn^[8]. Syarat kelarutan unsur pepadu adalah unsur yang mempunyai raji ion lebih kecil 15-20% dibandingkan raji ion zirkonium (Zr). Raji ion pepadu dan beberapa sifat lainnya dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Sifat-sifat unsur Zr dan pepadunya Mo dan Sn ^[9]

Sifat	Unsur		
	Zr	Mo	Sn
Ruji atom, Å	2,16	2,0	1,72
Struktur kristal	bcc	heksagonal	tetragonal
Titik leleh, K	212 5	289 0	505
Titik didih, K	468 2	498 2	287 6
Elektronegativitas, Pauling	1,33	2,16	1,96

Paduan adalah larutan padat suatu logam ke dalam logam lain dan membentuk fasa baru. Ada dua tipe paduan yaitu substitusi dan interstisi. Pada substitusi, suatu atom mengganti atom struktur asli, dan pada interstisi, suatu atom yang lebih kecil masuk ke dalam ruang antar atom logam. Berdasarkan ruji atom, pepaduan Mo kemungkinan besar substitusi dan pepaduan Sn kemungkinan besar interstisi.

Dengan model struktur terjejal heksagonal, kisi heksagonal mempunyai dua lubang untuk proses interstisi yaitu lubang oktahedral dan lubang tetrahedral. Lubang oktahedral mempunyai enam bilangan koordinasi, sedangkan lubang tetrahedral mempunyai empat bilangan koordinasi. Interstisi oktahedral juga terjadi pada pusat bidang struktur kubus.

Keterbatasan kelarutan padat juga dapat didekati dengan teori zona (*zone theory*) zone yaitu adanya energi maksimum Fermi, bahwa perbandingan elektron valensi terhadap jumlah atom paduan adalah tertentu. Untuk $ZrNi_3$ (fcc) dengan 12 elektron valensi dan 4 atom paduan, nilai perbandingannya adalah sebesar $12/4 = 3,0$. Fasa zirkonium alfa ($Zr-\alpha$) mempunyai 5,2 elektron per atom dan fasa beta mempunyai 8 elektron per atom. Maka dari itu, kelarutan pepaduan secara umum di fasa $Zr-\beta$ lebih besar jika dibandingkan dengan kelarutan di fasa $Zr-\alpha$.

Pertimbangan yang lain dalam paduan adalah elektronegativitas. Jika perbedaan elektronegativitas atom terlarut dan pelarut besar, maka kristal akan memiliki sifat ionik. Sebagai contoh, natrium dengan klor mempunyai perbedaan elektronegativitas sebesar 2,33 maka kristal tersebut bersifat ionik. Perbedaan elektronegativitas memang diperlukan supaya terjadi ikatan yang kuat. Timah dan molibdenum lebih elektronegatif jika dibandingkan dengan zirkonium ($Zr=1,33$; $Sn=1,96$; $Mo=1,33$)^[10].

2.2 Peleburan

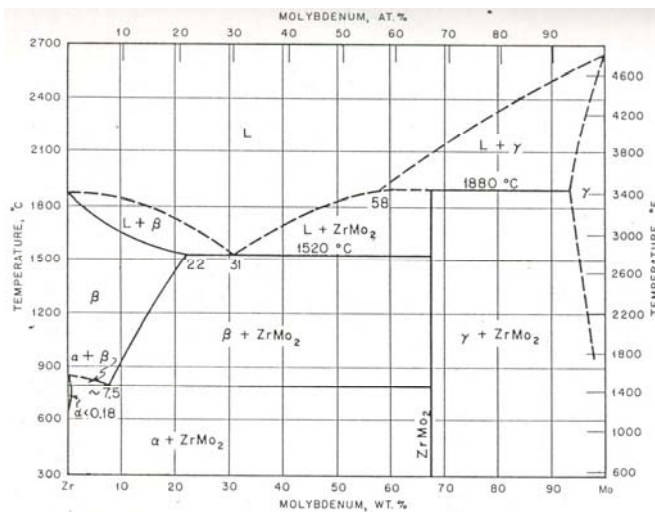
Logam zirkonium dalam bentuk spons (*sponge*) atau serbuk (*powder*) tidak dapat langsung difabrikasi menjadi bentuk masif (*massive shape*) tanpa konsolidasi (*consolidation*) dengan peleburan atau dengan teknik metalurgi serbuk yaitu sintering. Metode konsolidasi dalam penelitian ini menggunakan teknik peleburan busur listrik (*arc-melting*)^[11,12] Teknik tersebut menggunakan *non-consumable electrode*, pendingin air, atmosfer argon dan krusibel tembaga.

2.3 Diagram Fasa

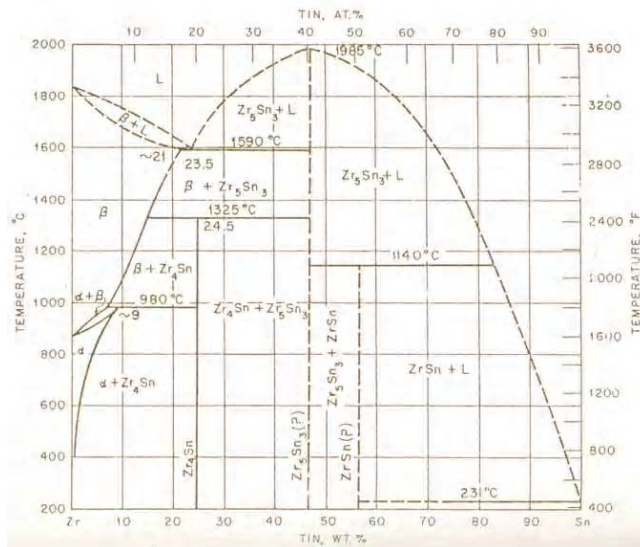
Diagram fasa zirkonium-molibdenum ditunjukkan pada Gambar 1. Sistem ini hanya mempunyai satu fasa intermediet yaitu $ZrMo_2$ ^[12] dengan $a_0 = 7,59 \text{ \AA}$. Senyawa intermediet ini terbentuk dari transformasi reaksi peritektik antara lelehan dan larutan padat molibdenum. Kelarutan molibdenum dalam zirkonium sangat rendah yaitu 0,18% dan kelarutan zirkonium

dalam molibdenum 10%. Dari diagram terlihat bahwa reaksi peritektik dan dekomposisi utektik tetap menghasilkan fasa- β yang merupakan akibat proses pendinginan peleburan dan pendinginan cepat (*quenching*).

Diagram fasa zirkonium-timah ditunjukkan pada Gambar 2. Sistem ini mempunyai banyak fasa intermediet yaitu Zr_4Sn , $ZrSn$, Zr_3Sn_2 dan Zr_5Sn_3 ^[14]. Kelarutan padat Sn dalam fasa- α adalah 1,2% dan dalam fasa- β adalah 21%. Reaksi peritektik dan dekomposisi utektik tidak menyisakan fasa- β . Struktur Zr_4Sn adalah tetragonal dengan $c_0 = 11,10 \text{ \AA}$ dan $a_0 = 6,90 \text{ \AA}$. Sedangkan struktur $ZrSn$ adalah ortorombik dengan $a_0 = 7,433 \text{ \AA}$, $b_0 = 5,822 \text{ \AA}$ dan $c_0 = 5,157 \text{ \AA}$.



Gambar 1. Diagram fasa paduan biner Zr-Mo



Gambar 2. Diagram fasa paduan biner Zr-Sn

2.4 Kekerasan

Kekerasan dipengaruhi oleh unsur pepadu yang membentuk fasa kedua hasil reaksi antara unsur matrik dengan unsur pepadunya. Fasa kedua dapat membentuk inklusi atau presipitat. Pengaruh oksigen, nitrogen dan karbon terhadap kekerasan sangat signifikan, sehingga atmosfer harus dikondisi dengan argon. Mikrostruktur juga berpengaruh pada kekerasan. Parameter mikrostruktur yang berpengaruh antara lain ukuran butir, bentuk butir, orientasi butir dan adanya fasa kedua yaitu inklusi dan presipitat. Karakteristik ukuran butir dapat dibentuk dengan perlakuan panas, perlakuan mekanik, kombinasi dari perlakuan mekanik dan panas, jenis paduan dan komposisi paduan.

III. TATA KERJA

Sampel paduan Zr-Sn-Mo dengan variabel konsentrasi unsur Mo, dibuat dengan komposisi Zr-0,5%Sn-(0,5;1,0;1,5;2,0)%Mo, seperti ditunjukkan pada Tabel 1. Serbuk diaduk dan dicampur selama 150 menit, selanjutnya dibuat pelet dengan ukuran 10 mm tinggi × 10 mm diameter pada tekanan 1,2 ton/cm². Hasil pengepresan ini disebut pelet mentah. Sebanyak 5 g pelet mentah dilebur dengan busur listrik dalam krusibel tembaga dan dikondisi dengan atmosfer gas argon. Tekanan ruang bakar tungku 2 psi dan arus busur 50 A. Analisis kimia ingot dilakukan dengan pendar sinar-X. Hasil analisis kimia dipaparkan pada Tabel 1. Ingot dipanaskan pada temperatur 1100°C selama 2 jam dan didinginkan cepat dalam air. Setelah pendinginan cepat, sampel dipotong dengan pisau intan (*diamond blade*) dengan ukuran sekitar 5×2×10 mm. Selanjutnya sampel dianil pada temperatur 500°C, 600°C, 700°C dan 750°C selama 4 jam. Uji metalografi dilakukan dengan mikroskop optik, dan uji kekerasan dengan uji kekerasan mikro Vickers.

Tabel 1. Komposisi kimia hasil peleburan Zr-0,5%Sn-(0,5;1,0;1,5;2,0)%Mo

Unsur	Zr-0,5%Sn -0,5%Mo	Zr-0,5%Sn -1,0%Mo	Zr-0,5%Sn -1,5%Mo	Zr-0,5%Sn -2,0%Mo
Zr	99,9504	98,4865	97,9369	97,4850
Sn	0,5086	0,5107	0,5065	0,5075
Mo	0,5410	1,0028	1,5566	2,0075

*Zr = unsur zirkonium; Sn = unsur timah; Mo = unsur molibdenum; % = persen berat.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

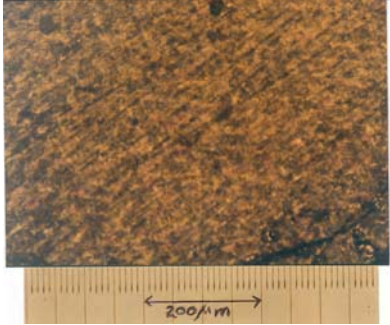
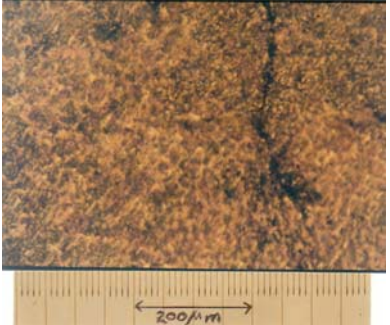
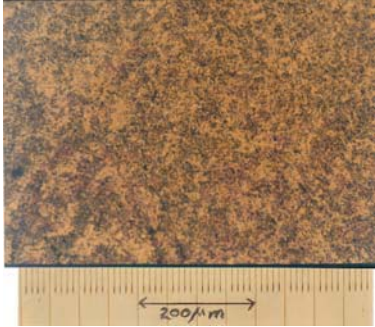
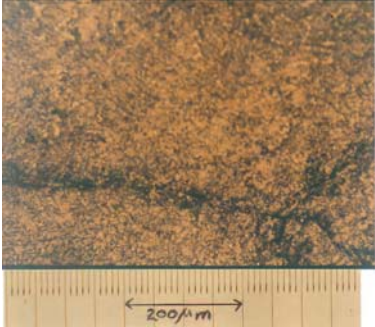
4.1 Fasa Hasil Peleburan

Berdasarkan diagram fasa biner Zr-Mo dan Zr-Sn (Gambar 1 dan Gambar 2), kemungkinan fasa yang terbentuk dari hasil peleburan adalah fasa Zr- α , ZrMo₂ dan Zr₄Sn. Hal ini mengingat konsentrasi pepadu Sn sebesar 0,5% dan konsentrasi Mo (0,5;1,0;1,5;2,0)%.

4.2 Mikrostruktur

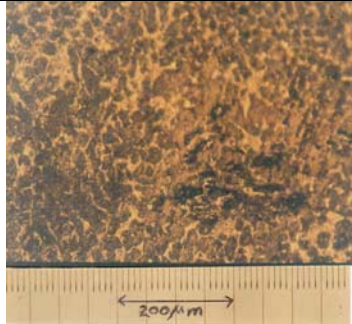
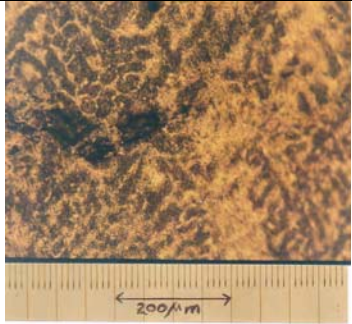
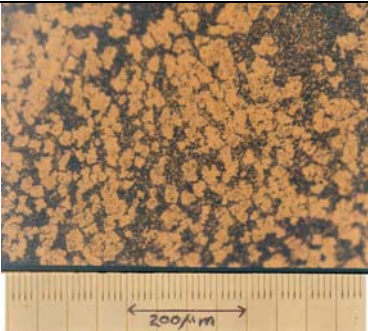
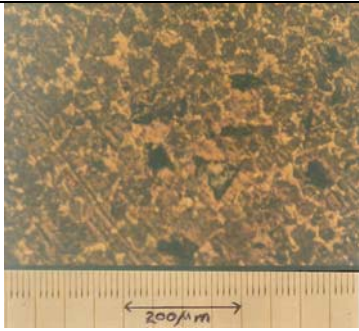
• Pemanasan 400°C

Pada pemanasan 400°C selama 4 jam, mikrostruktur paduan Zr-0,5%Sn-0,5%Mo ditunjukkan pada Gambar 3, paduan Zr-0,5%Sn-1,0%Mo pada Gambar 4, paduan Zr-0,5%Sn-1,5%Mo pada Gambar 5 dan paduan Zr-0,5%Sn-2,0%Mo pada Gambar 6. Ukuran butir mikrostruktur tersebut terlalu halus dan sulit diidentifikasi. Fakta ini menunjukkan bahwa proses rekristalisasi dan pertumbuhan butir tidak berjalan sempurna.

	
Gambar 3. Mikrostruktur Zr-0,5%Sn-0,5%Mo hasil anil 400°C selama 4 jam, perbesaran 200×	Gambar 4. Mikrostruktur Zr-0,5%Sn-1,0%Mo hasil anil 400°C selama 4 jam, perbesaran 200×
	
Gambar 5. Mikrostruktur Zr-0,5%Sn-1,5%Mo hasil anil 400°C selama 4 jam, perbesaran 200×	Gambar 6. Mikrostruktur Zr-0,5%Sn-2,0%Mo hasil anil 400°C selama 4 jam, perbesaran 200×

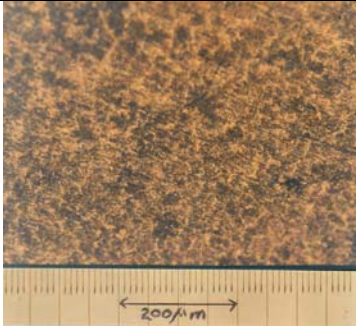
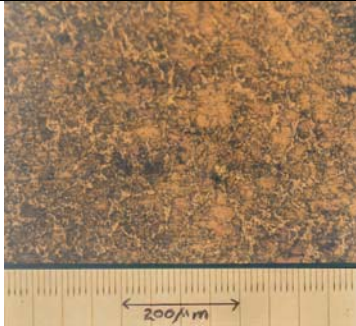
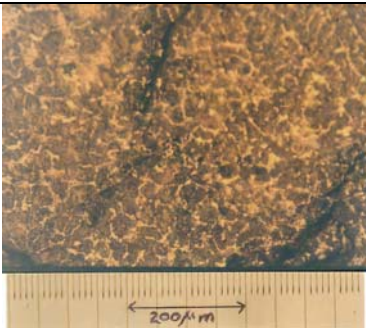
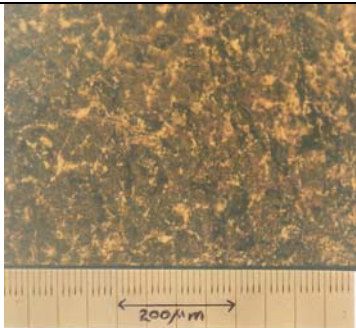
- **Pemanasan 500°C**

Pada pemanasan 500°C selama 4 jam, mikrostruktur paduan Zr-0,5%Sn-0,5%Mo ditunjukkan pada Gambar 7, paduan Zr-0,5%Sn-1,0%Mo pada Gambar 8, paduan Zr-0,5%Sn-1,5%Mo pada Gambar 9 dan paduan Zr-0,5%Sn-2,0%Mo pada Gambar 10. Berdasarkan mikrostruktur tersebut, ukuran butirnya dapat diidentifikasi. Hal ini berarti pemanasan pada 500°C sudah baik untuk proses pengintian dan pertumbuhan butir.

	
<p>Gambar 7. Mikrostruktur Zr-0,5%Sn-0,5%Mo hasil anil 500°C selama 4 jam, perbesaran 200×</p>	<p>Gambar 8. Mikrostruktur Zr-0,5%Sn-1,0%Mo hasil anil 500°C selama 4 jam, perbesaran 200×</p>
	
<p>Gambar 9. Mikrostruktur Zr-0,5%Sn-1,5%Mo hasil anil 500°C selama 4 jam, perbesaran 200×</p>	<p>Gambar 10. Mikrostruktur Zr-0,5%Sn-2,0%Mo hasil anil 500°C selama 4 jam, perbesaran 200×</p>

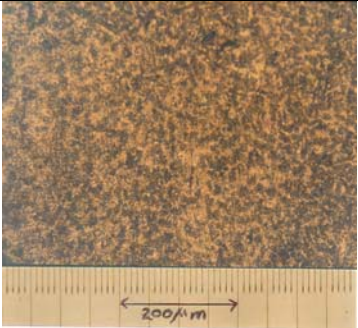
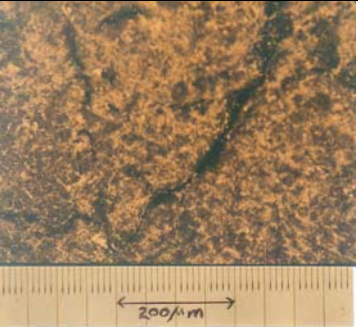
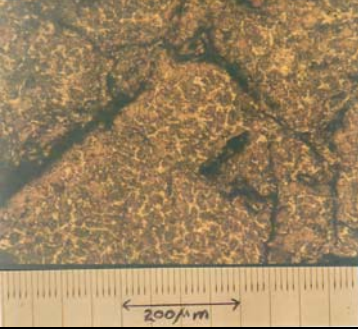
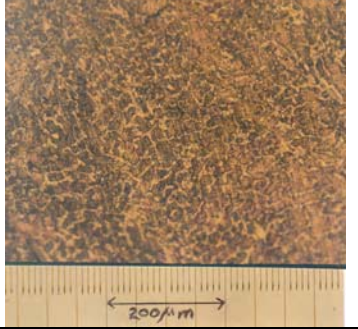
- **Pemanasan 600°C**

Pada pemanasan 600°C selama 4 jam, mikrostruktur paduan Zr-0,5%Sn-0,5%Mo ditunjukkan pada Gambar 11, paduan Zr-0,5%Sn-1,0%Mo pada Gambar 12, paduan Zr-0,5%Sn-1,5%Mo pada Gambar 13 dan paduan Zr-0,5%Sn-2,0%Mo pada Gambar 14. Pada pemanasan 600°C laju pengintian menyamai laju pertumbuhan butir, sehingga butir yang terlihat pada mikrostruktur tidak jelas. Terlihat seolah-olah ukuran butirnya besar tetapi tidak mempunyai batas butir yang jelas, sehingga ukuran butir tidak dapat ditentukan. Pada pemanasan 600°C terjadi keretakan yang menyeberangi batas butir. Keretakan ini kemungkinan besar disebabkan oleh tidak baiknya kualitas paduan hasil peleburan sehingga dengan adanya gradien temperatur yang besar, bahan tidak mampu menahan gaya distorsi termal.

	
Gambar 11. Mikrostruktur Zr-0,5%Sn-0,5%Mo hasil anil 600°C selama 4 jam, perbesaran 200×	Gambar 12. Mikrostruktur Zr-0,5%Sn-1,0%Mo hasil anil 600°C selama 4 jam, perbesaran 200×
	
Gambar 13. Mikrostruktur Zr-0,5%Sn-1,5%Mo hasil anil 600°C selama 4 jam, perbesaran 200×	Gambar 14. Mikrostruktur Zr-0,5%Sn-2,0%Mo hasil anil 600°C selama 4 jam, perbesaran 200×

- **Pemanasan 700°C**

Pada pemanasan 700°C selama 4 jam, mikrostruktur paduan Zr-0,5%Sn-0,5%Mo ditunjukkan pada Gambar 15, paduan Zr-0,5%Sn-1,0%Mo pada Gambar 16, paduan Zr-0,5%Sn-1,5%Mo pada Gambar 17 dan paduan Zr-0,5%Sn-2,0%Mo pada Gambar 18. Pada pemanasan 700°C mikrostrukturnya mirip dengan hasil pemanasan pada 600°C, bahwa laju pengintian menyamai laju pertumbuhan butir sehingga batas butir sulit diidentifikasi. Akan tetapi, untuk paduan Zr-0,5%Sn-2,0%Mo pada Gambar 18 ukuran butirnya dapat ditentukan. Pada pemanasan 700°C juga terjadi keretakan yang menyeberangi batas butir.

	
<p>Gambar 15. Mikrostruktur Zr-0,5%Sn-0,5%Mo hasil anil 700°C selama 4 jam, perbesaran 200×</p>	<p>Gambar 16. Mikrostruktur Zr-0,5%Sn-1,0%Mo hasil anil 700°C selama 4 jam, perbesaran 200×</p>
	
<p>Gambar 17. Mikrostruktur Zr-0,5%Sn-1,5%Mo hasil anil 700°C selama 4 jam, perbesaran 200×</p>	<p>Gambar 18. Mikrostruktur Zr-0,5%Sn-2,0%Mo hasil anil 700°C selama 4 jam, perbesaran 200×</p>

4.3 Ukuran Butir

Distribusi ukuran butir telah dibuat. Pengukuran butir dilakukan menggunakan metode titik potong, dengan pengamatan langsung. Jika kondisi pemanasannya sesuai meliputi waktu, temperatur dan siklus, maka diperoleh ukuran butir yang teratur (*equiaxed*). Dengan demikian diperoleh distribusi ukuran butir yang mendekati distribusi normal. Oleh karena itu, analisis ukuran butir didasarkan pada distribusi normal (Fungsi Gauss/*Gaussian Function*). Berdasarkan distribusi normal, frekuensi paling banyak merupakan harga rerata (\bar{x}). Simpangan baku (σ) dapat diperoleh dari $\sqrt{\bar{x}}$. Jika interval ukuran butir ditentukan pada tingkat kepercayaan 95%, maka interval ukuran butir berada di antara $(\bar{x} - 3\sigma)$ sampai $(\bar{x} + 3\sigma)$. Distribusi ukuran butir dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Distribusi ukuran butir untuk paduan Zr-0,5%Sn-(0,5;1,0;1,5;2,0)%Mo

Ukuran butir (μ m)	Frekuensi ukuran butir (μ m)				
	0,5%Mo, 500°C, 4 jam	1,0%Mo, 500°C, 4 jam	1,5%Mo, 500°C, 4 jam	2,0%Mo, 500°C, 4 jam	1,5%Mo, 700°C, 4 jam
3,3	75				
6,6	75	5			
9,9	75	15	20		25
13,2	115	30	60		25
16,5	85	55	65		30
19,8	85	115	80	10	90
23,1	75	95	5	5	85
26,4	65	85	50	5	40
29,7	30	55	25	5	35
33,0	35	60	25	20	35
36,3	30	40	45	50	30
39,6	20	25	40	30	10
42,9	20	10	15	5	
46,2	10	15	20	5	
49,5	5	50	20	30	
52,8			15	15	
56,1			25	15	
59,4			5	15	
62,7			5	5	
66,0				5	
69,3				5	
72,6				5	
75,9					
79,2					
82,5					
\bar{X}	13,2	19,8	19,8	36,3	19,8
σ	3,6	4,5	4,5	6,0	4,5
3σ	10,9	13,4	13,4	18,1	13,4
$(\bar{X} - 3\sigma)$	2,3	6,5	6,5	18,2	6,5
$(\bar{X} + 3\sigma)$	24,1	33,2	33,2	54,4	33,2

Keterangan: \bar{X} : Besar butir rerata (μ m)
 σ : Simpangan baku besar butir (μ m)
 3σ : Simpangan baku besar butir pada tingkat kepercayaan 95% (μ m)
 $(\bar{X} - 3\sigma)$: Besar butir minimum (μ m)
 $(\bar{X} + 3\sigma)$: Besar butir maksimum (μ m)

Paduan Zr-0,5%Sn-0,5%Mo yang dipanaskan pada 500°C selama 4 jam mempunyai ukuran butir rerata 13,2 μm dengan simpangan baku 3,6 μm . Pada tingkat kepercayaan 95% diperoleh ukuran butir antara 2,3 μm sampai 24,1 μm .

Paduan Zr-0,5%Sn-1,0%Mo mempunyai ukuran butir rerata 19,8 μm dengan simpangan baku 4,5 μm . Pada tingkat kepercayaan 95% diperoleh ukuran butir antara 6,5 μm sampai 33,2 μm .

Paduan Zr-0,5%Sn-1,5%Mo mempunyai ukuran butir rerata 19,8 μm dengan simpangan baku 4,5 μm . Pada tingkat kepercayaan 95% diperoleh ukuran butir antara 6,5 μm sampai 33,2 μm .

Paduan Zr-0,5%Sn-2,0%Mo mempunyai ukuran butir rerata 36,3 μm dengan simpangan baku 6,0 μm . Pada tingkat kepercayaan 95% diperoleh ukuran butir antara 18,2 μm sampai 54,4 μm .

Paduan Zr-0,5%Sn-1,5%Mo yang dipanaskan pada 700°C selama 4 jam mempunyai ukuran butir rerata 19,8 μm dengan simpangan baku 4,5 μm . Pada tingkat kepercayaan 95% diperoleh ukuran butir antara 6,5 μm sampai 33,2 μm .

Pada pemanasan 500°C selama 4 jam ukuran butir naik dengan bertambahnya konsentrasi Mo dari 0,5% hingga 2,0% dan ukuran butirnya meningkat dari 13,2 μm sampai 36,3 μm . Tetapi paduan dengan kadar Mo 1,5 % yang dipanaskan 500°C selama 4 jam mempunyai ukuran butir sama dengan yang dipanaskan pada 700°C selama 4 jam.

4.4 Kekerasan Mikro

Hasil uji kekerasan mikro paduan Zr-0,5%Sn-(0,5;1,0;1,5;2,0)%Mo dapat dilihat pada Tabel 3 dan Gambar 19 untuk pengaruh temperatur anil, serta Gambar 20 untuk pengaruh konsentrasi. Kekerasan mikro naik dengan bertambahnya konsentrasi Mo hingga konsentrasi 1,5%. Pada konsentrasi Mo sebesar 2,0% nilai kekerasan rata-rata paling kecil dibandingkan ketiga paduan tersebut.

$$\text{Vickers Hardness Number (VHN)} = \text{DPH} = \{2 P \sin(\theta/2)\} / (D^2) \quad (1)$$

dimana P = beban (kgf)

D = diagonal jejak rerata (μm)

θ = sudut piramid penjejak = 136°

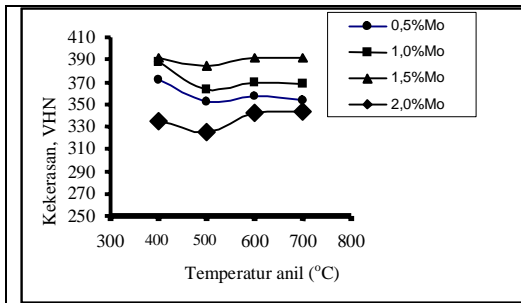
Tabel 3. Kekerasan mikro Zr-0,5%Sn-(0,5;1,0;1,5;2,0)%Mo dengan variabel temperatur anil

%Mo	400°C		500°C		600°C		700°C	
	AVE	DEV	AVE	DEV	AVE	DEV	AVE	DEV
0,5Mo	371,52	12,92	352,48	14,80	356,48	18,12	353,72	20,12
1,0Mo	388,12	35,56	362,68	23,12	370,00	24,80	368,40	23,08
1,5Mo	392,00	23,76	383,68	34,48	391,40	25,04	391,40	25,04
2,0Mo	335,40	18,68	325,00	18,16	381,72	15,40	343,88	23,20

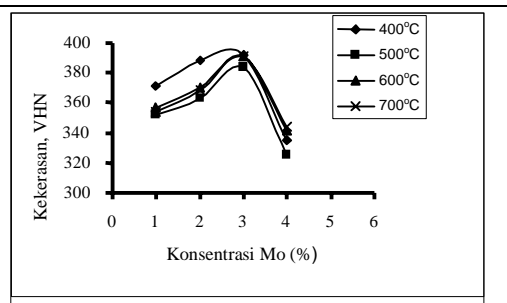
*AVE adalah harga rerata kekerasan dalam VHN atau DPH, DEV adalah simpangan standar kekerasan dalam VHN atau DPH, angka (400, 500, 600, 700)°C adalah temperatur anil, %

adalah konsentrasi Mo dalam persen berat, angka (0,5;1,0;1,5;2,0)%Mo adalah besarnya konsentrasi Mo dalam paduan Zr-0,5%Sn-(%)Mo.

Pengaruh temperatur anil terhadap kekerasan untuk keempat paduan tersebut mempunyai pola yang sama pada kisaran temperatur 400-700°C. Kekerasan keempat paduan tersebut turun dari paduan yang dipanaskan 400°C ke paduan yang dipanaskan 500°C. Saat paduan dipanaskan pada 600°C kekerasannya naik kembali dan menjadi datar saat paduan dipanaskan pada 700°C.



Gambar 19. Kekerasan mikro vs temperatur anil paduan Zr-0,5%Sn-(%)Mo



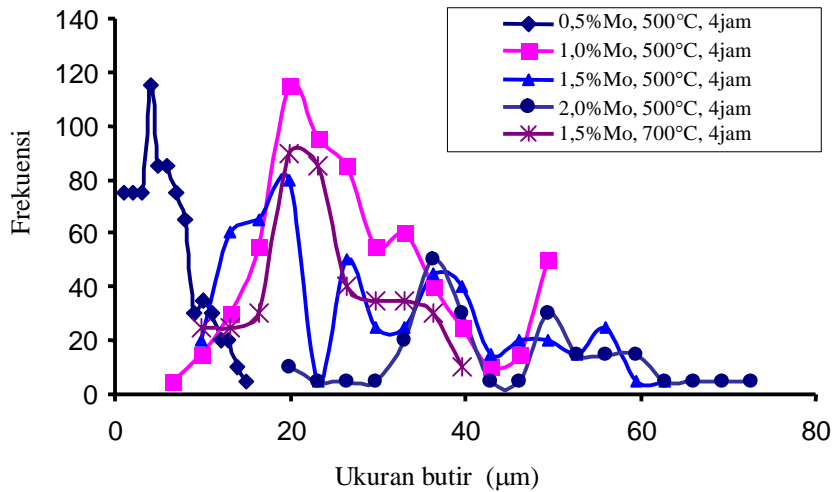
Gambar 20. Kekerasan mikro vs konsentrasi Mo paduan Zr-0,5%Sn-(%)Mo

Pengaruh temperatur anil terhadap kekerasan dapat dipahami dari diagram fasa Zr-Mo (Gambar 1). Berdasarkan diagram fasa Zr-Mo, terdapat daerah $\alpha+\beta$ antara temperatur 600°C sampai dengan temperatur 800°C di sekitar konsentrasi Mo sebesar 0,18%.

Berdasarkan Gambar 20, kekerasan meningkat seiring dengan naiknya konsentrasi Mo hingga konsentrasi Mo sebesar 1,5%. Pola kurva kekerasan ini kemungkinan besar akibat terbentuknya $ZrMo_2$. Pada konsentrasi Mo sebesar 2,0% justru kekerasannya turun kemungkinan akibat kelarutan Mo dalam fasa α -Zr meningkat. Sebagai akibatnya jumlah fasa kedua $ZrMo_2$ berkurang dan bahan menjadi lunak.

4.5 Ukuran Butir dan Kekerasan

Ukuran butir yang mampu diidentifikasi hanyalah pada satu set pemanasan 500°C dari keempat paduan Zr-0,5%Sn-(0,5;1,0;1,5;2,0)%Mo yang dipanaskan pada 500°C selama 4 jam (Gambar 21). Dari konsentrasi Mo 0,5% sampai 1,5%, ukuran butir meningkat dari 13,2 μm menjadi 19,8 μm dan naik menjadi 36,3 μm pada konsentrasi Mo sebesar 2,0%. Pada interval besar butir tersebut, kekerasan mikro naik dari 352,48 VHN menjadi 383,68 VHN dan pada konsentrasi Mo sebesar 2,0% kekerasan mikro turun menjadi 352,48 VHN. Jadi kekerasan mikro turun dengan naiknya ukuran butir.



Gambar 21. Distribusi ukuran butir paduan Zr-0,5%Sn-(0,5;1,0;1,5;2,0)%Mo

Korelasi kekerasan mikro dengan ukuran butir bertentangan dengan formulasi bahwa kekuatan tarik dan juga kekerasan berbanding terbalik dengan diameter butir, artinya semakin kecil ukuran butir suatu paduan semakin besar kekuatannya atau semakin meningkat kekerasannya. Seharusnya semakin besar ukuran butir tersebut, bahan menjadi semakin lunak. Jadi yang menentukan kekerasan pada paduan tersebut bukan ukuran butir tetapi kemungkinan besar fasa kedua $ZrMo_2$. Hal ini mengingat pada konsentrasi 1% pemuatan, kekerasan Zr-Mo adalah 55 HRA, jauh lebih besar jika dibandingkan dengan Zr-Sn sebesar 35 HRA^[14].

Disamping fasa kedua $ZrMo_2$, kemungkinan besar terjadi fasa kedua Zr_4Sn yang juga dapat berpengaruh pada kekerasan paduan tersebut. Kemungkinan terbentuknya fasa kedua Zr_4Sn didasarkan pada diagram fasa biner Zr-Sn pada Gambar 2. Pada pemanasan 400°C, Zr_4Sn masih banyak pada fasa α -Zr, sedangkan pada pemanasan 500°C mulai banyak Zr_4Sn yang terlarut ke dalam fasa α -Zr. Proses ini dapat dilihat di daerah konsentrasi Sn sebesar 0,5%. Teori ini juga sesuai dengan fakta bahwa kekerasan turun dari 371,52 VHN menjadi 353,72 VHN pada pemanasan dari 400°C hingga 700°C.

V. KESIMPULAN

1. 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 μm menjadi 19,8 μm untuk konsentrasi Mo 0,5% sampai 1,5% dan meningkat tajam menjadi 36,3 μm pada konsentrasi Mo sebesar 2,0%.
2. 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%.
3. Secara umum kekerasan mikro turun dengan naiknya temperatur pemanasan antara 400°C-700°C dan mempunyai harga maksimum pada konsentrasi Mo sebesar 1,5%.

VI. DAFTAR PUSTAKA

1. HARBOTTLE, J.E., and STRASSER, A.A., Towards Failure-Free Fuel Review 1994, Nuclear Engineering International, 1994, pp.28-30.
2. STRASSE, A., O'BOYLE, D., and YANG, R., Reliability - The First Priority in Fuel Performance, Proceedings 1994 International Topical Meeting on Light Water Reactor Fuel Performance, Florida, April 17-21, 1994, p.3.
3. WANKLYN, J.N., et.al., Report UK AERE-R3768, Part 11, July 1961, in, PARFENOV, B.G, GERASIMOV, V.V., and VENEDIKTOVA, G.I., Corrosion of Zirconium and Zirconium Alloys, IPST Ltd., Jerusalem, 1961, p.16.
4. IVANOV, O.S., and GRIGOROVICH, V.K., Proceeding of International Conference on the Peaceful Use of Atomic Energy, Vol. 5, 1958, p.2046.
5. BAUGERT, L., Atomwirtschaft, Vol. 9. No. 9, 1960, p.408.
6. DOMINGE, T.R., et.al., Nuclear Energy, Vol. 6. No. 2, 1964, p.89.
7. CHIRIGOS, J.N., et.al, Fuel Element Fabrication with Special Emphasis on Cladding Materials, Proceeding of Symposium held in Vienna, Academic Press, New York, Vol. 1, 1961, p.19.
8. Ibid (4), p.1.
9. SERGENT-WELCH, Table of Periodic Properties of Elements, Sergent-Welch Scientific Company, Illinois, 1980.
10. ANONYMOUS, Table of Periodic Properties of The Elements, Sergent Welch Scientific Company.
11. KROLL, W.J., and GILBERT, H.L., Melting and Casting Zirconium Metal, Trans. Electrochemistry Society, No. 96, 1946, p.124.
12. HERRES, S.A., and DAVIS, J.A., Arc-Melting Refractory Metals, Steel, No. 82, 1949, p.124.
13. DOMANGGALA, R.F., McPHERSON, D.J., and HANSEN, M., System Zirconium Molybdenum and Zirconium Wolfram, Transaction American Institute, Mining Metallurgical.
14. LUSTMAN, B., and KERZE, F.J.R., The Metallurgy of Zirconium, 1st ed., McGraw-Hill, New York, 1955, p.538.