

## PENGARUH DEFORMASI DINGIN TERHADAP KARAKTER PADUAN Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr PASCA PERLAKUAN PANAS

Sungkono<sup>\*</sup>, Kartika Sari<sup>\*\*</sup>, Nani Yuliani<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup> Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir – BATAN, Serpong

<sup>\*\*</sup> Program Studi Fisika, MIPA, Fakultas Sains dan Teknik,

Universitas Negeri Jenderal Soedirman Purwokerto

*e-mail:* sungkhana@gmail.com

(Diterima 26-4-2011, disetujui 27-5-2011)

### ABSTRAK

**PENGARUH DEFORMASI DINGIN TERHADAP KARAKTER PADUAN Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr PASCA PERLAKUAN PANAS.** Logam paduan Zr-Mo-Fe-Cr dikembangkan untuk mendapatkan material kelongsong yang mempunyai sifat mekanik, fisis, dan ketahanan korosi tinggi dalam lingkungan iradiasi di reaktor nuklir. Tujuan penelitian ini adalah mendapatkan pengaruh deformasi dingin terhadap karakter paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr pasca perlakuan panas. Metode yang digunakan meliputi pengamatan mikrostruktur dengan mikroskop optik, kekerasan dengan *microhardness vickers tester*, dan komposisi kimia dengan XRF. Hasil penelitian menunjukkan bahwa paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr pasca perlakuan panas 650-750 °C dan waktu penahanan 1 jam mengalami retak pada pengerolan dingin dengan reduksi 5-15%, sedangkan pasca perlakuan panas 650-750 °C dan waktu penahanan 1,5-2 jam mampu menerima reduksi tebal 5-15% tanpa retak. Kekerasan paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr pasca perlakuan panas 650-750 °C semakin tinggi seiring dengan semakin besarnya deformasi dingin yang diterapkan. Komposisi Mo dalam paduan Zr-Mo-Fe-Cr pasca perlakuan panas (750 °C, 1 jam) dan pengerolan dingin ( $r = 15\%$ ) adalah 0,2508% berat atau 83,60% dari teoritis. Karakteristik paduan yaitu mikrostruktur, kekerasan dan komposisi kimia dipengaruhi oleh perlakuan panas dan deformasi dingin.

**KATA KUNCI:** Paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr, perlakuan panas, deformasi dingin, mikrostruktur, kekerasan, komposisi kimia.

### ABSTRACT

**EFFECTS OF COLD DEFORMATION ON THE CHARACTERISTICS OF Zr-0.3%Mo-0.5%Fe-0.5%Cr ALLOY AFTER HEAT TREATMENT.** Zr-Mo-Fe-Cr alloy is developed to obtain a cladding material that possesses high mechanical, physical and corrosion resistant properties that can withstand irradiation in the nuclear reactor. The objective of this research is to study the effects of cold deformation on the characteristics of Zr-0.3%Mo-0.5%Fe-0.5%Cr alloy after heat treatment. The methods employed included microstructure observation using optical microscope, hardness using microhardness Vickers tester, and chemical composition using XRF. The results of this research show

*that the Zr-0.3%Mo-0.5%Fe-0.5%Cr alloy after heat treatment at 650 -750 °C and soaking time of 1 hour experienced cracking during cold rolling with reductions of 5-15%, whereas the alloys after heat treatment at 650 - 750 °C and soaking time of 1.5-2 hours sustained thickness reductions of 5-15% without cracking. The hardness of Zr-0.3%Mo-0.5%Fe-0.5%Cr alloys after heat treatment at 650-750 °C became higher with larger applied cold deformation on the alloy. The composition of Mo in Zr-0.3%Mo-0.5%Fe-0.5%Cr alloy following heat treatment (750 °C, 1 hour) and cold rolling ( $r = 15\%$ ) is 0.2508 wt%, or theoretically 83.60%. In general, the characteristics of the Zr-Mo-Fe-Cr alloy, i.e. microstructure, hardness, and chemical composition, are found to be affected by heat treatment and cold deformation.*

*FREE TERMS: Zr-0.3%Mo-0.5%Fe-0.5%Cr alloy, heat treatment, cold deformation, microstructure, hardness, chemical composition.*

## I. PENDAHULUAN

Logam paduan berbasis zirkonium dapat digunakan sebagai bahan kelongsong elemen bakar untuk Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) karena mempunyai sifat fisis, mekanik, neutronik, dan ketahanan korosi yang baik. Hal ini dipersyaratkan karena kelongsong bahan bakar nuklir bertindak sebagai *security barrier* guna mencegah terlepasnya bahan radioaktif ke pendingin. Material kelongsong bahan bakar yang digunakan sampai saat ini adalah zircalloy-4 untuk reaktor daya tipe PWR, zircalloy-2 untuk tipe BWR dan PHWR, Zr-Nb untuk GCR<sup>[1]</sup>.

Para peneliti di negara-negara maju melakukan berbagai inovasi untuk meningkatkan efisiensi reaktor daya tipe air ringan (LWR). Salah satu solusi yang dikembangkan adalah meningkatkan efisiensi penggunaan bahan bakar di dalam teras reaktor, yaitu dengan cara menaikkan fraksi bakar (*burn up*). Untuk mendapatkan kinerja bahan bakar tersebut, maka dibutuhkan material kelongsong yang mempunyai sifat mekanik, sifat fisis, ketahanan korosi tinggi dalam lingkungan iradiasi di teras reaktor nuklir. Solusi yang diajukan adalah mengembangkan paduan berbasis zirkonium dengan menggunakan unsur-unsur pepadu yang dapat meningkatkan ketangguhan dan ketahanan korosi dengan tanpa atau sedikit menaikkan serapan neutron termal. Unsur pepadu yang memenuhi kriteria tersebut antara lain timah putih (Sn), niobium (Nb), molibdenum (Mo), besi (Fe), khrom (Cr) dan nikel (Ni)<sup>[1,2]</sup>.

Logam paduan zirkonium dengan unsur pepadu utama molibdenum, besi dan khrom telah dikembangkan sebagai kandidat bahan kelongsong di masa mendatang. Logam paduan Zr-Mo-Fe-Cr dengan unsur Mo dalam rentang 0,3 sampai dengan 1,3% berat, serta Fe dan Cr tetap yaitu masing-

masing 0,5% berat telah dibuat. Teknologi proses fabrikasi logam paduan Zr-Mo-Fe-Cr terus dikembangkan dalam upaya untuk meningkatkan sifat mekanik dan ketahanan korosi, dengan sedikit atau tanpa mengurangi sifat neutroniknya<sup>[3]</sup>.

Pada proses fabrikasi suatu material umumnya merupakan gabungan antara proses pengerjaan panas dan pengerjaan dingin. Proses pengerjaan panas bertujuan untuk mendapatkan mikrostruktur berupa butir ekuiaksial yang seragam, sehingga paduan lebih lunak dan memudahkan proses pengerjaan logam paduan berikutnya. Oleh karena logam paduan menjadi lunak memungkinkan terjadinya proses deformasi cukup besar tanpa retak, dan gaya pembentukan lebih rendah dibandingkan pengerjaan logam paduan dengan mikrostruktur tidak seragam<sup>[4]</sup>. Untuk meningkatkan kekuatan mekanik dan penyelesaian permukaan lebih baik, maka dilakukan pengerjaan dingin terhadap logam paduan pasca pengerjaan panas.

Pada penelitian ini, proses perlakuan panas terhadap ingot leburan paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr dilakukan dengan 2 (dua) variasi temperatur yaitu 650 dan 750 °C, 3 (tiga) variasi waktu penahanan 1; 1,5; dan 2 jam, dengan pendinginan sampel di dalam tungku. Selanjutnya dilakukan pengerolan dingin terhadap paduan Zr-Mo-Fe-Cr pasca perlakuan panas, dengan reduksi tebal ( $r$ ) 5, 10 dan 15%.

Penelitian bertujuan mendapatkan pengaruh deformasi dingin terhadap karakter paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr pasca perlakuan panas. Hipotesa yang diajukan adalah deformasi dingin diduga dapat mengubah bentuk mikrostruktur dari butir ekuiaksial ke bentuk pipih terdeformasi sehingga kekuatan dan kekerasan paduan lebih tinggi tanpa getas.

## **II. TATA KERJA**

### **2.1. Bahan**

Bahan yang digunakan dalam penelitian adalah paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr, resin *acrylic* dan pengeras, kertas ampelas, kain poles, pasta alumina, larutan etsa, dan alkohol.

### **2.2. Peralatan**

Peralatan yang digunakan dalam penelitian adalah tungku perlakuan panas, mesin potong, mesin gerinda dan poles, mesin rol, mikroskop optik, *microhardness vickers tester*, dan *X-ray fluorescence (XRF)*.

### **2.3. Cara Kerja**

### 2.3.1. Perlakuan panas

Perlakuan panas terhadap ingot paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr menggunakan tungku perlakuan panas dengan gas Argon sebagai gas pelindung pada temperatur 650 dan 750 °C dengan waktu penahanan 1; 1,5; dan 2 jam, kemudian sampel didinginkan dalam tungku.

### 2.3.2. Pengerolan dingin

Proses pengerolan dingin terhadap sampel paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr pasca perlakuan panas dilakukan pada temperatur kamar, dengan reduksi tebal 5, 10, dan 15%.

### 2.3.3. Metalografi

Proses metalografi terhadap sampel ingot leburan, pasca perlakuan panas, pasca perlakuan panas dan pengerolan dingin dilaksanakan dengan 5 (lima) tahapan yaitu proses pemotongan untuk mendapatkan sampel metalografi, pembersihan, penggerindaan, pemolesan, dan pengetsaan<sup>[5]</sup>. Penggerindaan sampel menggunakan mesin gerinda dengan kertas ampelas grit 320 sampai dengan 2400 mesh. Penggerindaan dilakukan hingga diperoleh sampel datar, rata, dan bebas goresan. Pemolesan sampel menggunakan mesin poles dengan bahan poles pasta intan grit 0,1 µm. Pemolesan dilakukan hingga diperoleh sampel yang datar, rata, licin, dan bebas goresan. Selanjutnya sampel pasca poles dietsa dengan metoda usap hingga diperoleh sampel yang mengkilap seperti cermin. Larutan etsa yang digunakan adalah campuran 15 mL HNO<sub>3</sub>, 30 mL HF, 30 mL HCl, dan 25 mL aquades.

### 2.3.4. Uji kekerasan

Uji kekerasan mikro terhadap sampel paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr pasca pemolesan dilakukan dengan *microhardness vickers tester*<sup>[6]</sup>. Pada uji kekerasan sampel ini digunakan beban 200 lb.

### 2.3.5. Uji komposisi kimia

Sampel standar berupa pelat Zr yang telah diketahui kemurniannya, diuji dengan XRF dan dihasilkan spektrum dengan puncak karakteristik K $\alpha$  untuk Zr. Kemudian dengan cara yang sama dilakukan untuk sampel standar pelat Mo, pelat Fe, atau pelat Cr dan dihasilkan puncak karakteristik K $\alpha$  masing-masing untuk Mo, Fe, atau Cr<sup>[7]</sup>. Sampel paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr pasca pemolesan diuji dengan XRF dan dihasilkan spektrum dengan puncak

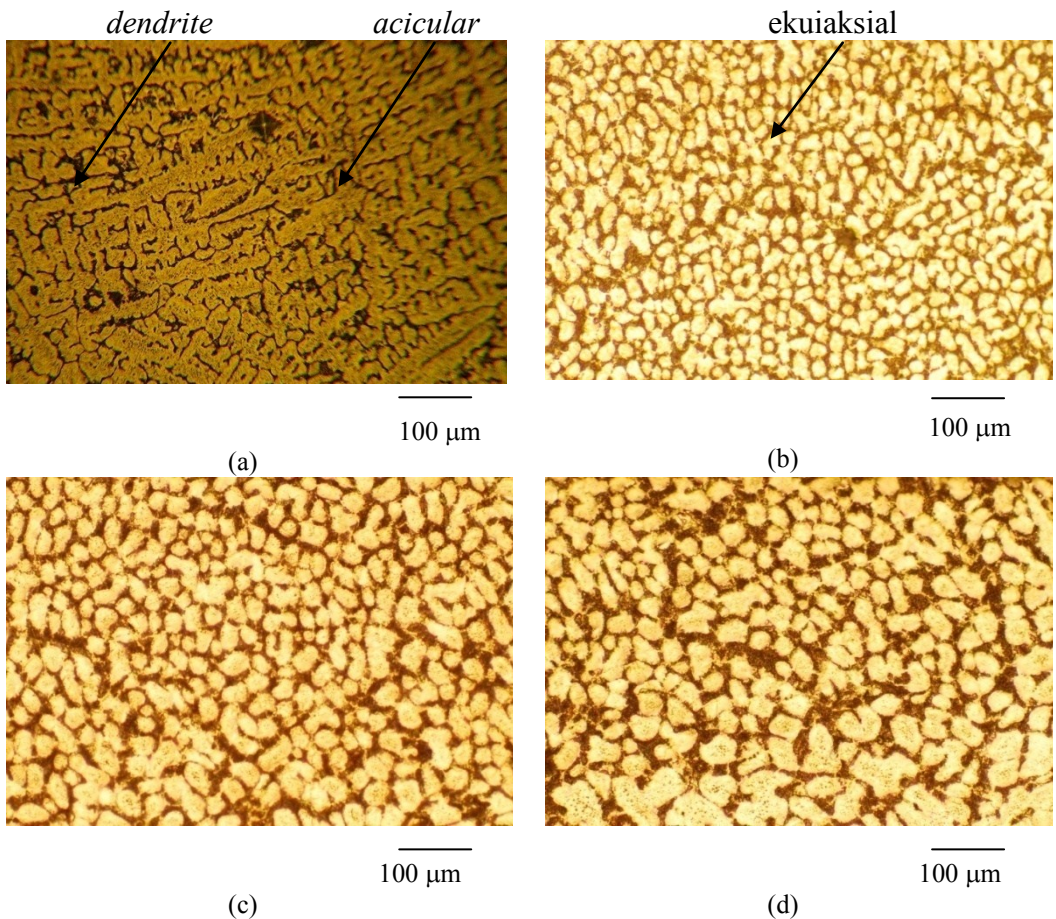
$K\alpha$  yang bersesuaian dengan energi karakteristik atom Zr, Mo, Fe, atau Cr. Berdasarkan data spektrum sampel standar Zr, Mo, Fe, atau Cr dan sampel paduan Zr-Mo-Fe-Cr dapat dihitung secara kuantitatif persentase berat unsur Zr, Mo, Fe, dan Cr yang ada di dalam paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr.

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1. Mikrostruktur

Pada penelitian ini, proses perlakuan panas terhadap paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr dilakukan dengan dua variasi temperatur yaitu 650 dan 750 °C, tiga variasi waktu penahanan 1; 1,5; dan 2 jam, dengan pendinginan sampel di dalam tungku. Gambar 1 memperlihatkan mikrostruktur paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr pasca perlakuan panas pada temperatur 650 °C. Pada Gambar 1 terlihat adanya perubahan struktur butir dari *dendrite* dan *acicular* (Gambar 1a) menjadi butir ekuiaksial kecil (Gambar 1b). Hal ini menunjukkan bahwa proses perlakuan panas (650 °C, 1 jam) terhadap paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr mendekati sempurna. Paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr yang mempunyai struktur butir ekuiaksial kecil akan mempunyai kekerasan tinggi, sehingga dibutuhkan gaya pembentukan tinggi pada proses pengerolan paduan tersebut. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, dibutuhkan paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr yang mempunyai struktur butir ekuiaksial relatif besar dan homogen agar bersifat lunak sehingga gaya pembentukan rendah dan deformasi yang diterapkan terhadap paduan logam relatif besar tanpa retak<sup>[8]</sup>.

Untuk mendapatkan mikrostruktur berupa butir ekuiaksial relatif besar maka paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr dipanaskan pada temperatur tetap (650 °C) dengan waktu penahanan 1,5 jam (Gambar 1c) dan waktu penahanan 2 jam (Gambar 1d). Gambar 1c memperlihatkan mikrograf berupa butir ekuiaksial dengan ukuran relatif lebih besar dibandingkan dengan ukuran butir ekuiaksial dari mikrograf Gambar 1b, sedangkan mikrograf Gambar 1d mempunyai butir ekuiaksial dengan ukuran lebih besar dibandingkan ukuran butir ekuiaksial pada Gambar 1b dan 1c. Kondisi tersebut menunjukkan terjadinya pertumbuhan butir ekuiaksial akibat waktu penahanannya lebih lama pada 650 °C, sehingga atom-atom mampu menata diri dan butir ekuiaksial kecil bergabung satu sama lain dan membentuk butir baru ekuiaksial dengan ukuran lebih besar dan tidak seragam. Proses pertumbuhan butir ekuiaksial belum sempurna sehingga paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr perlu dilakukan pemanasan pada temperatur lebih tinggi, 750 °C, dengan waktu penahanan tetap yaitu 1; 1,5; dan 2 jam.



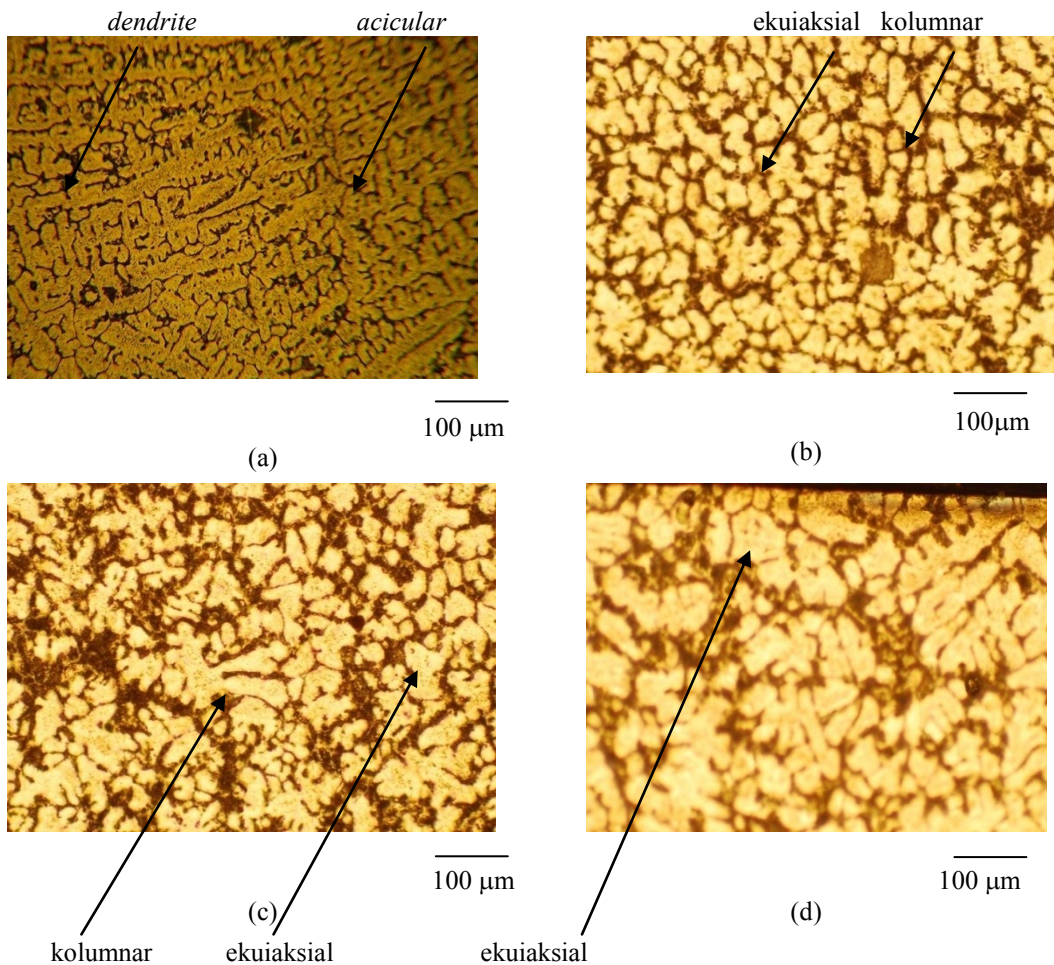
Gambar 1. Mikrograf paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr dan pasca perlakuan panas pada temperatur 650 °C. Perbesaran : 200X.

(a) leburan; (b) waktu penahanan 1 jam,  
(c) waktu penahanan 1,5 jam; (d) waktu penahanan 2 jam.

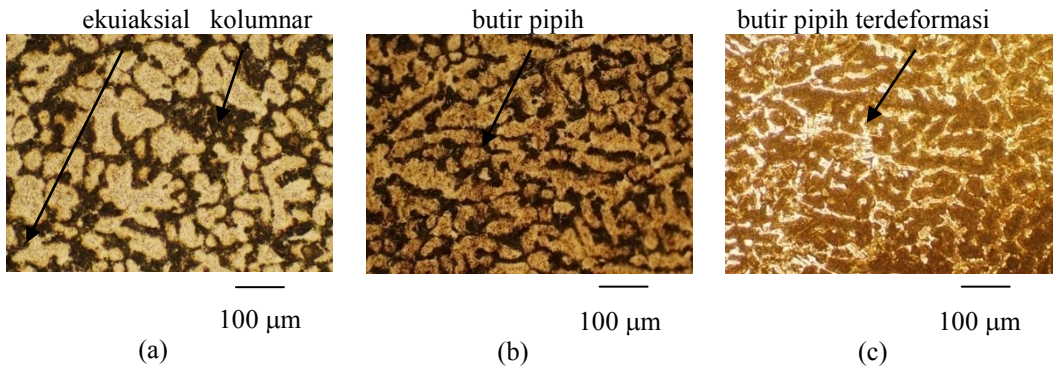
Gambar 2 memperlihatkan mikrograf paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr pasca perlakuan panas (750 °C, 1 jam) mempunyai struktur butir campuran kolumnar dan ekuiaksial. Sementara itu terjadi pertumbuhan butir kolumnar dan ekuiaksial pasca perlakuan panas (750 °C; 1,5 jam), kemudian mengarah ke bentuk butir ekuiaksial dengan ukuran relatif besar pasca perlakuan panas (750 °C, 2 jam).



Gambar 3 memperlihatkan pengaruh deformasi akibat pengerolan dingin terhadap mikrostruktur paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr pasca perlakuan panas (650 °C, 1 jam). Paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr pasca perlakuan panas (650 °C, 1 jam) mempunyai mikrostruktur berupa butir ekuiaksial kecil sehingga mempunyai kekerasan tinggi dan bersifat getas. Pada proses pengerolan dingin, paduan mendapat tekanan yang besar dari dua buah rol kerja dengan reduksi tebal 5%. Tekanan tersebut tidak mampu.



Gambar 2. Mikrograf paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr leburan dan pasca perlakuan panas pada temperatur 750 °C. Perbesaran : 200X. (a) leburan; (b) waktu penahanan 1 jam, (c) waktu penahanan 1,5 jam; (d) waktu penahanan 2 jam.

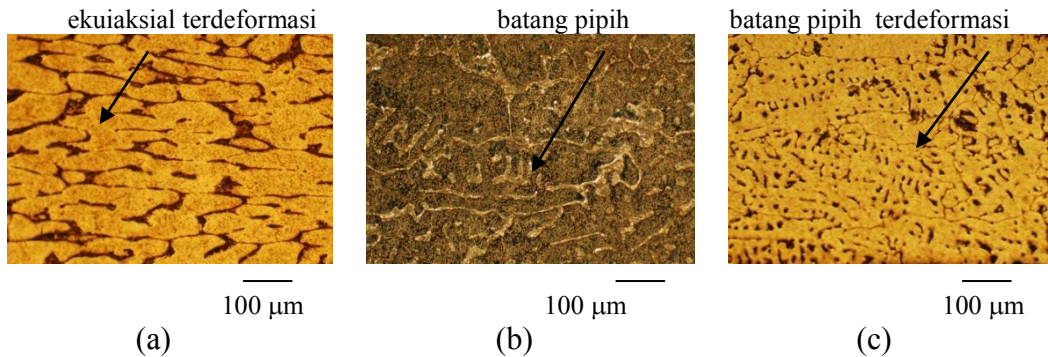


Gambar 3. Mikrograf paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr pasca perlakuan panas (650 °C, 1 jam) dan pengerolan dingin. Perbesaran : 200X. (a)  $r = 5\%$  ; (b)  $r = 10\%$  ; (c)  $r = 15\%$ .

ditahan oleh gaya ikat antar atom paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr pasca perlakuan panas (650 °C, 1 jam) yang keras dan getas, sehingga permukaan sampel retak<sup>[8]</sup>. Sampel yang retak tersebut apabila dilihat mikrostrukturnya berupa campuran butir ekuiaksial dan kolumnar yang terdeformasi (Gambar 3a), untuk reduksi 10% mikrostrukturnya berupa batang pipih (Gambar 3b), kemudian batang pipih terdeformasi saat pasca perlakuan panas mengalami reduksi tebal 15% (Gambar 3c). Dengan demikian diketahui bahwa paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr pasca perlakuan panas (650 °C, 1 jam) tidak memenuhi syarat untuk menerima perlakuan mekanik berupa pengerolan dingin dengan reduksi tebal 5-15%.

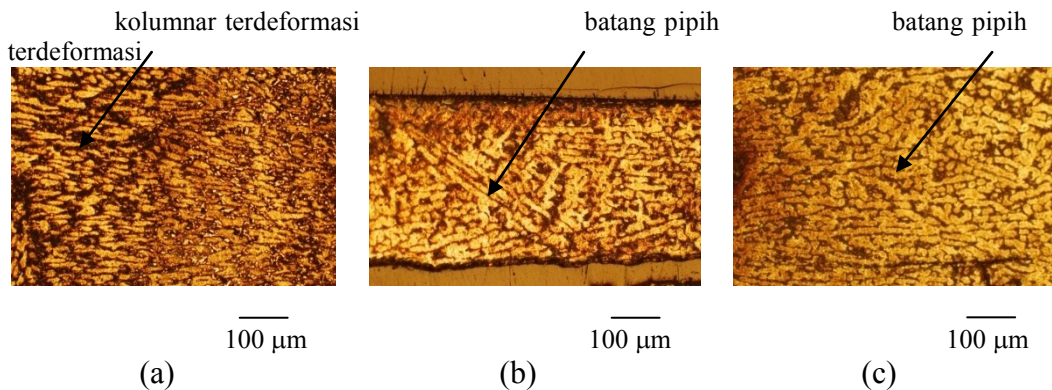
Gambar 4 memperlihatkan pengaruh deformasi akibat pengerolan dingin terhadap mikrostruktur paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr pasca perlakuan panas (650 °C; 1,5 jam). Pada reduksi 5% mikrostruktur paduan berupa butir ekuiaksial terdeformasi (Gambar 4a), kemudian berubah bentuk menjadi butir pipih pada reduksi 10% (Gambar 4b), dan butir pipih terdeformasi pada reduksi tebal 15% (Gambar 4c).





Gambar 4. Mikrograf paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr pasca perlakuan panas (650 °C; 1,5 jam) dan pengerolan dingin. Perbesaran : 200X. (a) r = 5% ; (b) r = 10% ; (c) r = 15%.

Gambar 5 memperlihatkan pengaruh deformasi akibat pengerolan dingin terhadap mikrostruktur ingot paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr pasca perlakuan panas (650 °C, 2 jam). Pada reduksi 5% mikrostruktur paduan berupa butir kolomar terdeformasi (Gambar 5a), kemudian berubah bentuk menjadi butir batang pipih pada reduksi 10% (Gambar 5b), dan batang pipih terdeformasi pada reduksi tebal 15% (Gambar 5c).



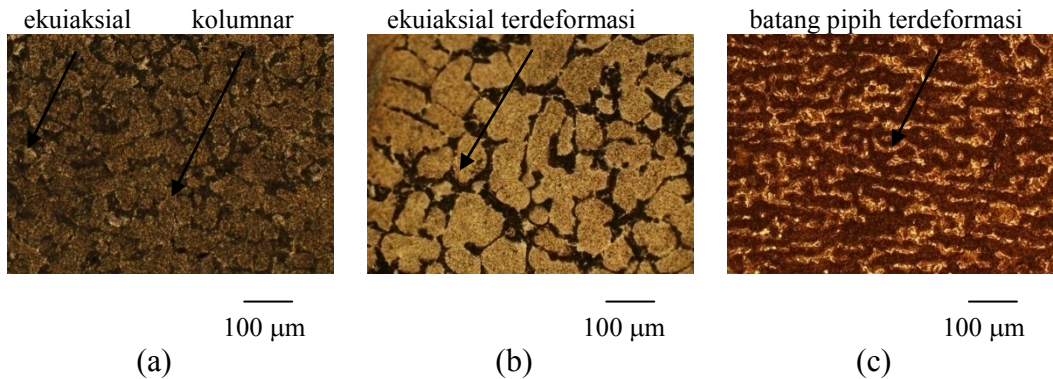
Gambar 5. Mikrograf paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr pasca perlakuan panas (650 °C, 2 jam) dan pengerolan dingin. Perbesaran : 200X. (a) r = 5% ; (b) r = 10% ; (c) r = 15%.

Perubahan bentuk butir dalam mikrostruktur paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr pasca perlakuan panas pada 650 °C dengan waktu penahanan

1,5 dan 2 jam akibat tekanan dari dua buah rol kerja. Tekanan tersebut mendapatkan perlawanan berupa gaya ikat antar atom dari paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr. Apabila gaya ikat antar atom mampu menahan tekanan rol maka hanya terjadi perubahan bentuk butir dari ekuiaksial ke batang pipih, sedangkan bila gaya ikat antar atom tidak mampu menahan tekanan rol maka paduan akan retak seperti yang terjadi dengan waktu penahanan 1 jam untuk reduksi tebal 5-15%.

Semakin besar deformasi yang diterapkan pada paduan maka semakin besar pula tekanan yang harus diterima atom-atom dari paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr. Kondisi tersebut mengakibatkan terjadinya efek pengerasan regangan (*strain hardening*) sehingga semakin besar deformasi yang diterapkan maka tegangan sisa semakin tinggi dan paduan semakin keras dan getas. Hal ini ditunjukkan dengan adanya butir berupa batang pipih terdeformasi dalam mikrostruktur paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr pasca perlakuan panas (650 °C; 1,5 jam) dan (650 °C, 2 jam) dengan reduksi tebal 15%<sup>[8]</sup>.

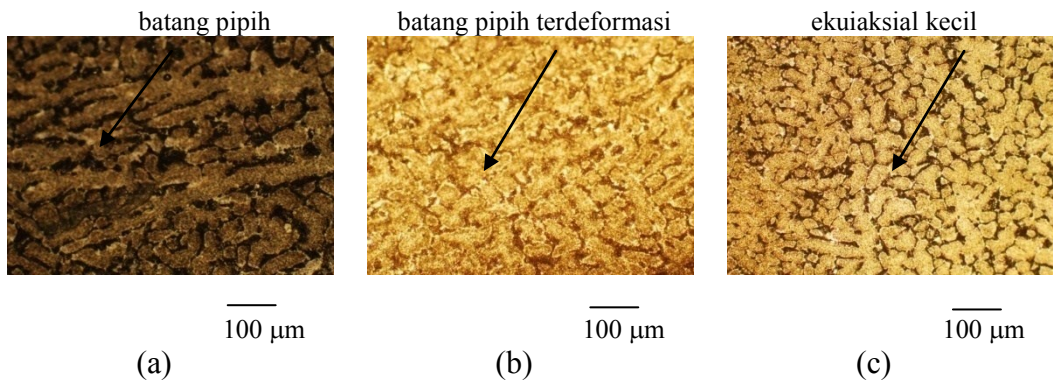
Gambar 6 memperlihatkan mikrostruktur ingot paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr pasca perlakuan panas (750 °C, 1 jam) yang telah mengalami pengerolan dingin dengan reduksi 5%, 10% dan 15%. Paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr pasca perlakuan panas (750 °C, 1 jam) mempunyai mikrostruktur berupa campuran butir ekuiaksial dan kolumnar kecil sehingga mempunyai tegangan sisa tinggi yang berdampak pada sifat paduan yaitu keras dan getas. Pada proses pengerolan dingin dengan reduksi tebal 5-15%, paduan mendapat tekanan yang besar dari dua buah rol kerja, tekanan tersebut tidak mampu ditahan oleh gaya ikat antar atom paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr pasca perlakuan panas (750 °C, 1 jam) yang keras dan getas, sehingga permukaan sampel retak. Sampel yang retak tersebut apabila dilihat mikrostrukturnya berupa campuran butir ekuiaksial dan kolumnar yang terdeformasi pada reduksi 5% (Gambar 6a), untuk reduksi 10% mikrostrukturnya berupa ekuiaksial terdeformasi (Gambar 6b), kemudian batang pipih terdeformasi saat paduan pasca perlakuan panas mengalami reduksi tebal 15% (Gambar 6c). Dengan demikian diketahui bahwa paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr pasca perlakuan panas (750 °C, 1 jam) tidak memenuhi syarat untuk menerima perlakuan mekanik berupa pengerolan dingin dengan reduksi tebal 5-15%.



Gambar 6. Mikrograf paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr pasca perlakuan panas (750 °C, 1 jam) dan pengerolan dingin.

Perbesaran : 200X. (a)  $r = 5\%$  ; (b)  $r = 10\%$  ; (c)  $r = 15\%$ .

Gambar 7 memperlihatkan mikrostruktur paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr pasca perlakuan panas (750 °C; 1,5 jam) dan pengerolan dingin dengan reduksi tebal 5%, 10%, dan 15%. Pada reduksi 5%, mikrostruktur paduan berupa batang pipih (Gambar 7a), sedangkan reduksi 10% berupa batang pipih terdeformasi (Gambar 7b), dan butir ekuiaksial kecil pasca reduksi tebal 15% (Gambar 7c).

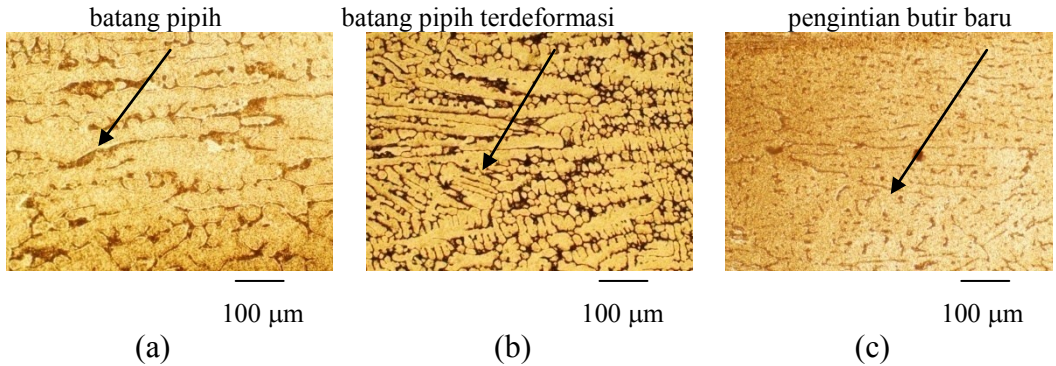


Gambar 7. Mikrograf paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr pasca perlakuan panas (750 °C; 1,5 jam) dan pengerolan dingin.

Perbesaran : 200X. (a)  $r = 5\%$  ; (b)  $r = 10\%$  ; (c)  $r = 15\%$ .

Gambar 8 memperlihatkan mikrostruktur paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr pasca perlakuan panas (750 °C, 2 jam) dan pengerolan dingin dengan

reduksi tebal 5%, 10%, dan 15%. Mikrostruktur paduan pasca reduksi 5% berupa butir pipih (Gambar 8a), pasca reduksi 10% berupa butir pipih terdeformasi (Gambar 8b), dan butir pipih yang telah mengalami pengintian butir-butir baru yang mengarah ke butir ekuiaksial kecil pada reduksi tebal 15% (Gambar 8c).



Gambar 8. Mikrograf paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr pasca perlakuan panas (750 °C, 2 jam) dan pengerolan dingin. Perbesaran : 200X. (a)  $r = 5\%$  ; (b)  $r = 10\%$  ; (c)  $r = 15\%$ .

Berdasarkan Gambar 7 dan 8 perubahan bentuk butir dalam mikrostruktur paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr yang terjadi pasca pengerolan dingin disebabkan oleh tekanan dua buah rol kerja terhadap paduan yang relatif lunak. Hal ini ditandai bentuk batang pipih dengan ukuran relatif besar pasca pengerolan dingin dengan reduksi tebal 5% (Gambar 7a dan 8a). Selain itu, terjadi pengintian butir-butir baru pada batang pipih yang terdeformasi mengarah ke bentuk butir ekuiaksial kecil pasca pengerolan dingin dengan reduksi 10% (Gambar 7b dan 8b) dan butir ekuiaksial kecil (Gambar 7c dan 8c). Kondisi tersebut menyebabkan paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr pasca perlakuan panas 750 °C dengan waktu penahanan 1,5 dan 2 jam mampu menerima deformasi 5-15% tanpa retak<sup>[8,9]</sup>.

### 3.2 Kekerasan

Hasil uji kekerasan mikro paduan Zr-Mo-Fe-Cr pasca perlakuan panas dan pengerolan dingin diperlihatkan pada Tabel 1, dimana kekerasan rata-rata paduan Zr-0,3% Mo-0,5%Fe-0,5%Cr pasca perlakuan panas pada 650 °C yang mengalami deformasi yang sama pada reduksi tebal dalam rentang 5-15%

menurun seiring dengan bertambahnya waktu penahanan. Penurunan kekerasan paduan Zr-0,3% Mo-0,5%Fe-0,5%Cr pasca perlakuan panas pada 650 °C seiring dengan bertambahnya waktu penahanan menyebabkan atom-atom mampu menata diri dan butir-butir bergabung satu sama lain sehingga terjadi pertumbuhan butir. Semakin besar ukuran butir dalam mikrostruktur paduan maka kekuatan atau kekerasan paduan semakin rendah. Hal ini sesuai dengan persamaan Hall-Petch :  $\sigma_Y = \sigma_{oY} + k / \sqrt{d}$ , dimana  $\sigma_Y$  adalah kekuatan luluh,  $N/mm^2$ ,  $\sigma_{oY}$  adalah konstanta,  $N/mm^2$ ,  $k$  adalah konstanta,  $N/mm^{3/2}$ , dan  $d$  adalah diameter ukuran butir,  $mm^{[10]}$ . Selain itu, dengan bertambahnya deformasi yang diterapkan terhadap paduan Zr-0,3% Mo-0,5%Fe-0,5%Cr pasca perlakuan panas pada 650 °C menyebabkan kekerasannya bertambah tinggi. Hal ini berkaitan dengan bertambahnya deformasi yang diterapkan pada paduan menyebabkan tegangan sisa bertambah tinggi sehingga kekerasan paduan bertambah tinggi pula.

Kekerasan rata-rata paduan Zr-0,3% Mo-0,5%Fe-0,5%Cr pasca perlakuan panas pada 750 °C yang mengalami deformasi yang sama pada reduksi tebal dalam rentang 5-15% naik seiring dengan bertambahnya waktu penahanan dalam rentang 1-1,5 jam kemudian turun pada waktu penahanan 2 jam. Hal ini disebabkan untuk waktu penahanan 1,5 dan 2 jam terjadi perubahan bentuk butir dari ekuiaksial dan kolumnar menjadi butir ekuiaksial terdeformasi, kemudian terjadi pengintian butir-butir baru pada batang pipih terdeformasi, dan akhirnya menjadi butir ekuiaksial kecil. Perubahan bentuk butir tersebut berkaitan dengan perubahan besarnya tegangan sisa dalam struktur paduan yang berbanding lurus dengan kekerasan paduan Zr-0,3% Mo-0,5%Fe-0,5%Cr. Dilain pihak, dengan bertambahnya deformasi yang diterapkan terhadap paduan Zr-0,3% Mo-0,5%Fe-0,5%Cr pasca perlakuan panas pada 750 °C menyebabkan kekerasannya bertambah tinggi. Hal ini berkaitan dengan bertambahnya deformasi yang diterapkan pada paduan menyebabkan tegangan sisa bertambah tinggi sehingga kekerasan paduan bertambah tinggi pula.

Tabel 1. Kekerasan paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr pasca perlakuan panas dan pengerolan dingin.

r (%)	HVN					
	650°C			750°C		
	1 jam	1,5 jam	2 jam	1 jam	1,5 jam	2 jam
5	445	403	369	424	437	330
10	512	405	384	438	464	349
15	511	420	393	442	474	412

Dengan demikian dapat diketahui bahwa semakin kecil ukuran butir dalam mikrostruktur paduan maka kekuatan atau kekerasan paduan semakin tinggi. Sementara itu, hubungan antara kekerasan dan kekuatan paduan dinyatakan secara empiris dengan persamaan  $\sigma_Y = (VHN/3) (0,1)^n$ , dimana  $\sigma_Y$  adalah kekuatan luluh ( $\text{kgf/mm}^2$ ), VHN adalah nilai kekerasan Vickers, dan n adalah eksponen pengerasan regangan<sup>[11]</sup>. Dengan demikian semakin tinggi kekerasan maka kekuatan paduan semakin tinggi pula atau sebaliknya.

### 3.3 Komposisi Kimia

Salah satu pengujian kendali kualitas yang dilakukan adalah pengukuran persentase berat unsur pepadu yang terkandung dalam paduan Zr-Mo-Fe-Cr. Metode pengukuran yang digunakan untuk menentukan kandungan unsur dalam paduan adalah XRF.

Tabel 2 memperlihatkan bahwa komposisi Mo pasca perlakuan panas (750 °C, 1 jam) dalam paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr adalah 0,2440 % berat atau 81,33% dari teoritis. Sementara itu, Tabel 3 menunjukkan bahwa komposisi Mo pasca perlakuan panas (750 °C, 1 jam) dan pengerolan dingin (r = 15%) dalam paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr adalah 0,2508% berat atau 83,60% dari teoritis.

Tabel 2. Komposisi kimia paduan Zr-Mo-Fe-Cr pasca perlakuan panas (750 °C, 1 jam).

Paduan	Komposisi paduan (% berat)							
	Teoritis				Pasca perlakuan panas			
	Zr	Mo	Fe	Cr	Zr	Mo	Fe	Cr
Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr	98,70	0,30	0,50	0,50	99,0522	0,2440	0,3418	0,3620



Tabel 3. Komposisi kimia paduan Zr-Mo-Fe-Cr pasca perlakuan panas (750°C, 1 jam) dan pengerolan dingin ( $r = 15\%$ ).

Paduan	Komposisi paduan (% berat)							
	Teoritis				Pasca perlakuan panas dan pengerolan dingin			
	Zr	Mo	Fe	Cr	Zr	Mo	Fe	Cr
Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr	98,70	0,30	0,50	0,50	98,9438	0,2508	0,4050	0,4004

Berdasarkan Tabel 2 dan Tabel 3 menunjukkan bahwa proses pengerolan dingin dapat membantu meningkatkan homogenisasi unsur pepadu dalam paduan Zr-Mo-Fe-Cr. Hal ini disebabkan gaya tekan akan menimbulkan pusat-pusat pengintian baru sehingga terbentuk butir-butir baru berupa batang pipih terdeformasi mengarah ke bentuk butir ekuiaksial kecil serta membantu mendistribusikan unsur pepadu searah pengerolan dingin. Kondisi yang ditampilkan pada Tabel 2 dan Tabel 3 menunjukkan bahwa distribusi unsur pepadu belum homogen di setiap titik dalam logam paduan Zr-Mo-Fe-Cr. Kemungkinan lain, kuantitas unsur pepadu berkurang pada saat proses preparasi pembuatan paduan Zr-Mo-Fe-Cr. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, maka paduan Zr-Mo-Fe-Cr leburan perlu dilakukan proses anil bertingkat guna menyempurnakan proses homogenisasi paduan Zr-Mo-Fe-Cr.

#### IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengolahan dan pengkajian data hasil penelitian tentang pengaruh pengerolan dingin terhadap karakter paduan Zr-Mo-Fe-Cr pasca perlakuan panas, dapat disimpulkan bahwa paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr pasca perlakuan panas 650-750 °C dan waktu penahanan 1 jam mengalami retak pada pengerolan dingin dengan reduksi tebal 5-15%, sedangkan pasca perlakuan panas 650-750 °C dan waktu penahanan 1,5-2 jam mampu menerima deformasi dengan reduksi tebal dalam rentang 5-15% tanpa retak. Kekerasan paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr pasca perlakuan panas 650-750 °C semakin tinggi seiring dengan bertambah besarnya deformasi dingin yang diterapkan. Komposisi Mo dalam paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr pasca perlakuan panas (750 °C, 1 jam) dan pengerolan dingin ( $r = 15\%$ ) adalah 0,2508% berat atau 83,60% dari teoritis. Karakteristik paduan Zr-Mo-Fe-Cr yaitu mikrostruktur, kekerasan, dan komposisi kimia dipengaruhi oleh perlakuan panas dan deformasi dingin.

## V. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Isfandi, Slamet Pribadi, Joko Kisworo, M. Ali Akbar, dan Rosika Kriswarini yang telah membantu preparasi sampel, pengerolan, pengamatan mikrostruktur, pengujian kekerasan, dan pengujian komposisi kimia sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik.

## VI. DAFTAR PUSTAKA

1. Cohen, P. (1985). *Water Coolant Technology of Power Reactors*. Illinois: American Nuclear Society.
2. Sungkono. (2004). Studi Pengaruh Penambahan Kandungan Mo Terhadap Kekuatan Tarik, Kekerasan, dan Ketahanan Korosi Paduan Zr-Mo-Fe-Cr. *Buletin URANIA*, 40, 15-19.
3. Sabol, G. P. and Comstock, R. J. (2002). Effect Dilute Alloy Additions of Molybdenum, Niobium, and Vanadium on Zirconium Corrosion, Zirconium In The Nuclear Industry. *ASTM International STP 1354*, December, 525 – 544.
4. Kalpakjian, S. (1995). *Manufacturing Engineering and Technology*. Massachusetts: Addison-Wesley Pub. Co.
5. Vander Voort, G. F. (2004). *ASM Handbook: Vol. 9. Metallography and Microstructures*. Ohio: ASM International, Materials Park, pp. 3 - 20
6. ASM. (2004). *ASM Handbook: Vol. 8. Microhardness Testing Metal Handbook*. Ohio : ASM International, Materials Park, pp. 90 - 130
7. Ewing, G. W. (1985). *Instrumental Methods of Chemical Analysis*, (pp. 204 – 212). New York: McGraw-Hill.
8. Sungkono. (2004). Pengaruh Parameter Proses Homogenisasi Terhadap Mikrostruktur dan Kekerasan Paduan Zr-Mo-Fe-Cr. *Jurnal Ilmiah Konduktor Padat*, 5, No. Edisi Khusus, 33-37.
9. Marques, F.D.S. (1982). Morphology/Substructure Relationships in Zirconium Based Martensites. *J. de Physique*, Dec, 309-314.
10. Agrawal, B. K. (2000). *Introduction to Engineering Materials*. New Delhi: Tata McGraw-Hill.
11. Dieter, G.E. (1988). *Mechanical Metallurgy*. New York: McGraw-Hill Book Co.