

**PENGARUH KANDUNGAN NIOBIUM TERHADAP
MIKROSTRUKTUR, KOMPOSISI KIMIA DAN KEKERASAN
PADUAN Zr-Nb-Fe-Cr**

Sungkonono

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir - BATAN, Serpong

ABSTRAK

PENGARUH KANDUNGAN NIOBIUM TERHADAP MIKROSTRUKTUR, KOMPOSISI KIMIA DAN KEKERASAN PADUAN Zr-Nb-Fe-Cr. Logam paduan Zr-Nb-Fe-Cr dibuat dengan cara mencampur serbuk Zr, Nb, Fe dan Cr dengan persentase berat tertentu sampai homogen, dan dilebur dalam tungku peleburan vakum. Tujuan penelitian adalah mempelajari pengaruh konsentrasi Nb terhadap mikrostruktur, komposisi kimia dan kekerasan paduan Zr-Nb-Fe-Cr. Mikrostruktur ingot paduan Zr-0,2%Nb-0,5%Fe-0,5%Cr secara kualitatif mempunyai struktur butir dengan ukuran relatif besar dibandingkan ingot paduan Zr-0,5%Nb-0,5%Fe-0,5%Cr dan Zr-0,8%Nb-0,5%Fe-0,5%Cr. Setelah perlakuan β -quenching dan homogenisasi, komposisi Nb dalam paduan Zr-0,2%Nb-0,5%Fe-0,5%Cr adalah $(0,16 \pm 0,02)\%$; dalam paduan Zr-0,5%Nb-0,5%Fe-0,5%Cr adalah $(0,41 \pm 0,07)\%$; dan dalam paduan Zr-0,8%Nb-0,5%Fe-0,5%Cr adalah $(0,64 \pm 0,12)\%$. Sedangkan kekerasan paduan Zr-0,8%Nb-0,5%Fe-0,5%Cr adalah 316 VHN, lebih tinggi dibandingkan Zr-0,5%Nb-0,5%Fe-0,5%Cr (= 299 VHN) dan Zr-0,2%Nb-0,5%Fe-0,5%Cr (= 297 VHN). Semakin besar kadar Nb yang terdapat dalam paduan Zr-Nb-Fe-Cr, maka ukuran butirnya relatif lebih kecil, kekerasannya lebih tinggi dan homogenisasi lebih sulit dicapai.

KATA KUNCI: Niobium, Mikrostruktur, Kekerasan, Paduan Zr-Nb-Fe-Cr, Homogenisasi

ABSTRACT

INFLUENCE OF NIOBIUM CONCENTRATION ON THE MICROSTRUCTURE, CHEMICAL COMPOSITION AND HARDNESS OF Zr-Nb-Fe-Cr ALLOYS. The Zr-Nb-Fe-Cr alloys are made by mixing homogeneously Zr, Nb, Fe and Cr powders in percentage weight, followed by melting in vacuum melting furnace. The objective of this research is to investigate the influence of Nb concentration on the microstructure, chemical composition and hardness of Zr-Nb-Fe-Cr alloys. The grain size of Zr-0.2%Nb-0.5%Fe-0.5%Cr ingot was qualitatively larger than those of Zr-0.5%Nb-0.5%Fe-0.5%Cr and Zr-0.8%Nb-0.5%Fe-0.5%Cr. After treatment by β -quenching and homogenizing, the composition of Nb in Zr-0.5%Nb-0.5%Fe-0.5%Cr was found to be $(0.16 \pm 0.02)\%$; in Zr-0.5%Nb-0.5%Fe-0.5%Cr it was $(0.41 \pm 0.07)\%$; and in Zr-0.8%Nb-0.5%Fe-0.5%Cr it was $(0.64 \pm 0.12)\%$. Meanwhile the value of hardness for Zr-0.8%Nb-0.5%Fe-0.5%Cr was 316 VHN, higher than those for Zr-0.5%Nb-0.5%Fe-0.5%Cr (= 299 VHN) and Zr-0.2%Nb-0.5%Fe-0.5%Cr (= 297 VHN). As Nb content in Zr-Nb-Fe-Cr alloys increases, the grain size becomes relatively smaller, the hardness gets higher and the homogeneity becomes more difficult to achieve.

FREE TERMS: Niobium, Microstructure, Hardness, Zr-Nb-Fe-Cr alloys, Homogenization

I. PENDAHULUAN

Logam paduan Zr–Nb–Fe–Cr dibuat dengan cara mencampur serbuk zirkonium (Zr), serbuk niobium (Nb), serbuk besi (Fe) dan serbuk kromium (Cr) dengan persentase berat tertentu sampai homogen, dan dilebur dalam tungku peleburan vakum sehingga diperoleh ingot^[1].

Unsur Nb yang ditambahkan ke dalam paduan berbasis zirkonium dimaksudkan untuk meningkatkan kekuatan paduan dan ketahanan korosi paduan dalam air dan uap lewat jenuh. Hal ini disebabkan unsur niobium dapat berfungsi memperhalus ukuran butir, sehingga memberikan peningkatan kekuatan mekanik paduan berbasis zirkonium. Niobium juga memfasilitasi pembentukan lapisan oksida yang tebal dan padat di permukaan paduan. Lapisan oksida tersebut berfungsi sebagai penghalang penetrasi ion oksigen ke permukaan logam, sehingga meningkatkan ketahanan korosi paduan berbasis zirkonium. Disamping itu, niobium mempunyaiampang lintang serapan neutron termal yang rendah ($\sigma_a = 1,15$ barn) sehingga penambahan unsur Nb akan meningkatkan ekonomi neutron termal paduan berbasis zirkonium^[1,2].

Unsur besi (Fe) ditambahkan ke dalam paduan berbasis zirkonium dengan maksud untuk menstabilkan ketahanan korosi paduan dalam air pada temperatur tinggi. Sedangkan unsur kromium (Cr) untuk menstabilkan ketahanan korosi paduan berbasis zirkonium selama oksidasi dalam air. Disamping itu, penambahan unsur Fe dan Cr ke dalam paduan Zr–Nb–Fe–Cr dimaksudkan juga untuk meningkatkan kekuatan mekanik paduan. Hal ini dimungkinkan dengan pembentukan presipitat $Zr(Fe, Cr)_2$ yang keras di dalam paduan Zr–Nb–Fe–Cr^[3,4].

Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh komposisi Nb terhadap mikrostruktur dan kekerasan paduan Zr–Nb–Fe–Cr. Sedangkan hipotesis penelitian adalah niobium (Nb) yang ditambahkan ke dalam paduan zirkonium merupakan unsur penginti sehingga akan memperhalus ukuran butir paduan zirkonium^[4,5]. Ukuran butir dalam mikrostruktur menentukan kekuatan dan kekerasan suatu logam paduan. Dengan demikian, adanya Nb diharapkan akan meningkatkan kekuatan dan kekerasan paduan zirkonium.

II. TATA KERJA

2.1 Bahan

Bahan penelitian yang digunakan adalah serbuk Zr, serbuk Nb, serbuk Fe, serbuk Cr, kertas amplas, resin *acrylic* dan pengeras, pasta intan, bahan etsa dan film ASA 200.

2.2 Alat

Peralatan penelitian yang digunakan adalah mesin press, tungku busur listrik, gergaji Accutom, tungku anil, peralatan metalografi, mikroskop optik dan spektrometer pendar sinar-X (XRF).

2.3 Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan adalah:

1. Pembuatan ingot logam paduan Zr–Nb–Fe–Cr menggunakan teknik peleburan.
2. Pengamatan mikrostruktur logam paduan Zr–Nb–Fe–Cr menggunakan teknik metalografi.
3. Pengujian kekerasan logam paduan Zr–Nb–Fe–Cr menggunakan kekerasan mikro *Vickers*.
4. Pengujian komposisi kimia logam paduan Zr–Nb–Fe–Cr menggunakan spektrometer pendar sinar-X (XRF).

2.4 Cara Kerja

1. Serbuk Zr dicampur dengan serbuk Fe sebanyak 0,5%, Cr sebanyak 0,5% dan Nb dengan variasi 0,2; 0,5 dan 0,8%. Berat total sampel dibuat 15 g.
2. Setiap sampel ditempatkan dalam wadah dan dilakukan pencampuran dengan alat pencampur selama 5×30 menit.
3. Setelah pencampuran serbuk homogen, dibuat pelet dengan pengompakan menggunakan mesin pres pada tekanan 2 MP (= 1,2 ton/cm²).
4. Sampel (3) dilebur dalam tungku peleburan yang divakumkan dengan cara mengalir gas argon. Ingot yang dihasilkan mengalami *remelting* 3 kali agar lebih masak.
5. Ingot langkah (4) dipotong sebagai sampel ingot leburan, kemudian sisa ingot mendapatkan perlakuan β -*quenching* pada T = 1050 °C, ditahan 15 menit, kemudian didinginkan cepat.
6. Hasil perlakuan (5) dipotong sebagai sampel β -*quenching*, kemudian sisa sampel mengalami perlakuan homogenisasi pada T = 650 °C, ditahan 2 jam, kemudian didinginkan dalam tungku.
7. Sampel ingot leburan, β -*quenching* dan homogenisasi diamati secara metalografi^[6], uji komposisi kimia^[7] dan uji kekerasan^[8].

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Mikrostruktur

Gambar 1 memperlihatkan mikrograf optik ingot logam paduan Zr–Nb–Fe–Cr *as melt*. Karakteristik mikrostruktur paduan Zr–Nb–Fe–Cr menunjukkan butir-butir pipih memanjang dan cenderung berbentuk dendrit. Pada gambar 1 terlihat bahwa semakin tinggi kadar Nb yang terdapat dalam paduan Zr–Nb–Fe–Cr, maka ukuran butirnya relatif lebih kecil seperti terlihat pada Gambar 1. Hal ini menunjukkan bahwa Nb merupakan unsur pengintan dalam proses solidifikasi ingot. Adanya Nb akan menimbulkan pusat-pusat pengintian pada proses solidifikasi ingot sehingga dapat memperhalus ukuran butir paduan Zr–Nb–Fe–Cr.



(a) Zr–0,2%Nb–0,5%Fe–0,5%Cr



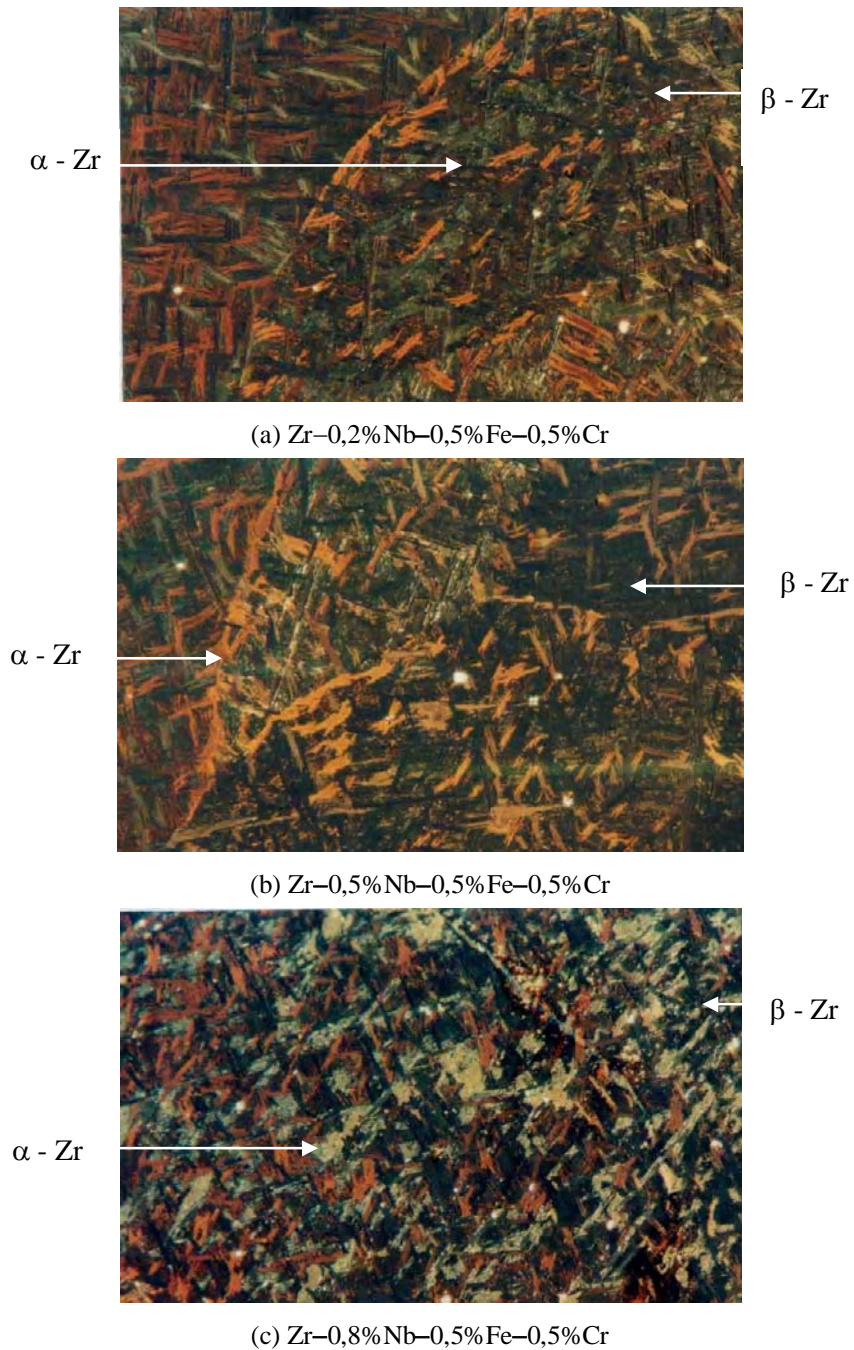
(b) Zr–0,5%Nb–0,5%Fe–0,5%Cr



(c) Zr–0,8%Nb–0,5%Fe–0,5%Cr

Gambar 1. Mikrograf optik ingot logam paduan Zr–Nb–Fe–Cr *as melt*
(perbesaran 200×)

Gambar 2 memperlihatkan mikrograf optik dari logam paduan Zr–Nb–Fe–Cr yang mengalami perlakuan β -*quenching*. Pada perlakuan β -*quenching*, logam paduan Zr–Nb–Fe–Cr dipanaskan pada fasa- β (1050 °C) selama 15 menit, kemudian didinginkan cepat dalam air. Gambar 2(a) menampilkan mikrostruktur Zr–0,2%Nb–0,5%Fe–0,5%Cr setelah perlakuan β -*quenching*. Pada gambar tersebut terlihat bahwa butir-butir α berbentuk pipih dan berjajar beraturan terperangkap dalam butir β . Sedangkan mikrostruktur Zr–0,5%Nb–0,5%Fe–0,5%Cr (Gambar 2(b)) dan Zr–0,8%Nb–0,5%Fe–0,5%Cr (Gambar 2(c)) memperlihatkan ukuran butir yang relatif lebih besar dibandingkan butir-butir yang terbentuk pada 0,2% Nb–0,5%Fe–0,5%Cr (Gambar 2(a) dan 2(b)) dengan morfologi yang relatif sama. Dengan demikian diketahui bahwa semakin besar kandungan Nb dalam paduan membutuhkan waktu *quenching* lebih cepat.

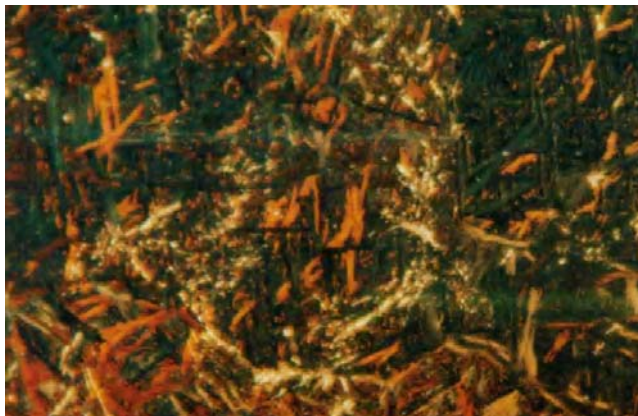


Gambar 2. Mikrograf optik logam paduan Zr-Nb-Fe-Cr yang mengalami β -quenching (perbesaran 200 \times)

Gambar 3(a) memperlihatkan mikrograf optik logam paduan Zr–0,2%Nb–0,5%Fe–0,5%Cr setelah β -*quenching* dan homogenisasi yaitu pada $T = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ selama 2 jam. Pada Gambar 3(a) tersebut terlihat bahwa fasa yang terbentuk dalam paduan Zr–Nb–Fe–Cr belum homogen. Kondisi serupa juga terjadi pada sampel Zr–0,5%Nb–0,5%Fe–0,5%Cr (Gambar 3(b)) dan sampel Zr–0,8%Nb–0,5%Fe–0,5%Cr (Gambar 3(c)).



(a) Zr–0,2%Nb–0,5%Fe–0,5%Cr



(b) Zr–0,5%Nb–0,5%Fe–0,5%Cr



(c) Zr-0,8%Nb-0,5%Fe-0,5%Cr

Gambar 3. Mikrograf optik ingot logam paduan Zr-Nb-Fe-Cr setelah homogenisasi pada $T = 650^{\circ}\text{C}$ dan $t = 2$ jam (perbesaran $200\times$)

Dari ketiga sampel yang telah mengalami β -quenching dan homogenisasi, sampel Zr-0,2%Nb-0,5%Fe-0,5%Cr memperlihatkan ukuran butirnya relatif paling seragam dibandingkan sampel Zr-0,5%Nb-0,5%Fe-0,5%Cr dan sampel Zr-0,8%Nb-0,5%Fe-0,5%Cr. Dengan demikian, dapat diketahui bahwa semakin besar Nb yang ditambahkan ke dalam paduan Zr-Nb-Fe-Cr, maka akan semakin sulit proses homogenisasinya. Hal ini disebabkan semakin besar kandungan Nb dalam paduan Zr-Nb-Fe-Cr untuk temperatur homogenisasi yang sama akan membutuhkan waktu homogenisasi lebih lama, atau temperatur homogenisasinya lebih tinggi dengan syarat tidak melebihi temperatur rekristalisasi, yaitu $0,5 \times$ titik lebur paduan ($= 788,5^{\circ}\text{C}$). Dengan memperlama waktu atau memperbesar temperatur homogenisasi dalam batas-batas tertentu diharapkan akan diperoleh mikrostruktur logam paduan Zr-Nb-Fe-Cr yang homogen bentuk dan ukuran butirnya.

3.2. Komposisi Paduan Zr-Nb-Fe-Cr

Tabel 1 menunjukkan komposisi paduan Zr-Nb-Fe-Cr setelah proses β -quenching dan homogenisasi. Pada tabel terlihat bahwa komposisi unsur pepadu Fe dan Cr belum sesuai yang diinginkan. Hal ini disebabkan proses homogenisasi terhadap paduan Zr-Nb-Fe-Cr belum sempurna, sehingga pada setiap titik dari paduan komposisi unsur pepadunya tidak sama.

Berdasarkan Tabel 1 dapat diketahui bahwa komposisi Nb dalam paduan Zr-0,2%Nb-0,5%Fe-0,5%Cr adalah $(0,16 \pm 0,02)\%$ dengan simpangan 12,5%; dalam paduan Zr-0,5%Nb-0,5%Fe-0,5%Cr adalah $(0,41 \pm 0,07)\%$ dengan simpangan 17,07%; dan dalam paduan Zr-0,8%Nb-0,5%Fe-0,5%Cr adalah $(0,64 \pm 0,12)\%$ dengan simpangan 18,75%. Oleh karena simpangan pengukuran komposisi Nb dalam paduan Zr-0,2%Nb-0,5%Fe-0,5%Cr paling rendah dibandingkan dalam paduan Zr-0,5%Nb-0,5%Fe-0,5%Cr dan Zr-0,8%Nb-0,5%Fe-0,5%Cr, maka paduan Zr-0,2%Nb-0,5%Fe-0,5%Cr lebih homogen dibandingkan paduan Zr-0,5%Nb-0,5%Fe-0,5%Cr dan Zr-0,8%Nb-0,5%Fe-0,5%Cr.

Kondisi ini membuktikan bahwa semakin tinggi kadar Nb yang dipadukan maka akan semakin sulit proses homogenisasinya.

Tabel 1. Komposisi unsur pepaduan dalam paduan Zr–Nb–Fe–Cr secara teoritis dan aktual setelah proses β -*quenching* dan homogenisasi

| No | Paduan | Komposisi paduan teoritis (%) | | | | Komposisi paduan aktual (%) | | | |
|----|-------------------------|-------------------------------|------|------|------|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|
| | | Zr | Nb | Fe | Cr | Zr | Nb | Fe | Cr |
| 1. | Zr–0,2%Nb–0,5%Fe–0,5%Cr | 98,80 | 0,20 | 0,50 | 0,50 | 99,54±0,03 | 0,16±0,02 | 0,42±0,04 | 0,44±0,04 |
| 2. | Zr–0,5%Nb–0,5%Fe–0,5%Cr | 98,50 | 0,50 | 0,50 | 0,50 | 99,60±0,06 | 0,41±0,07 | 0,37±0,11 | 0,39±0,09 |
| 3. | Zr–0,8%Nb–0,5%Fe–0,5%Cr | 98,20 | 0,80 | 0,50 | 0,50 | 99,66±0,10 | 0,64±0,12 | 0,35±0,13 | 0,37±0,12 |

3.3. Kekerasan

Tabel 2 memperlihatkan angka kekerasan Vickers logam paduan Zr–Nb–Fe–Cr yang telah mengalami perlakuan β -*quenching* dan homogenisasi. Pada tabel terlihat bahwa kekerasan ingot paduan Zr–0,2%Nb–0,5%Fe–0,5%Cr hasil leburan adalah 261 VHN, setelah β -*quenching* adalah 309 VHN, dan turun menjadi 297 VHN setelah homogenisasi. Hal ini disebabkan pada proses β -*quenching*, atom-atom dari unsur-unsur paduan tidak sempat menata diri dan butir-butirnya tidak sempat tumbuh, akibatnya butirnya berbentuk pipih dengan ukuran butir kecil.

Tabel 2. Angka kekerasan Vickers (VHN) ingot logam paduan Zr–Nb–Fe–Cr yang telah mengalami proses β -*quenching* dan homogenisasi. Beban uji kekerasan, F=49,02 N

| No | Proses perlakuan panas | Angka kekerasan Vickers (VHN) | | |
|----|---|-------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | | Zr–0,2%Nb–0,5%Fe–0,5%Cr | Zr–0,5%Nb–0,5%Fe–0,5%Cr | Zr–0,8%Nb–0,5%Fe–0,5%Cr |
| 1. | <i>As melt</i> | 261 | 269 | 274 |
| 2. | β - <i>quenching</i> | 309 | 338 | 340 |
| 3. | β - <i>quenching</i> , homogenisasi | 297 | 299 | 316 |

Kondisi butir-butir ini menyebabkan energi yang dibutuhkan relatif besar untuk mendeformasi sampel β -*quenching*. Sedangkan pada proses homogenisasi ($T = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 2\text{ jam}$), atom-atom unsur paduan mulai menata diri dan sebagian butir-butir pipih berubah geometrinya mengarah ke bentuk ekuiaksial. Energi yang dibutuhkan untuk mendeformasi sampel dengan butir-butir seperti tersebut lebih rendah dibandingkan sampel dengan butir-butir pipih, sehingga sampel homogenisasi mempunyai kekerasan lebih rendah dibandingkan sampel β -*quenching*. Dengan demikian dapat diketahui bahwa semakin kecil ukuran butir dalam mikrostruktur paduan maka kekuatan atau kekerasan paduan semakin tinggi. Hal ini sesuai dengan persamaan Hall-Petch^[9]:

$$\sigma_Y = \sigma_{oY} + \frac{k}{\sqrt{d}} \quad (1)$$

dimana σ_Y = kekuatan luluh (N/mm^2)
 σ_{oY} = konstanta (N/mm^2)
 k = konstanta ($\text{N/mm}^{3/2}$)
 d = diameter ukuran butir (mm).

Apabila kecenderungan kekerasan tersebut dibandingkan dengan mikrostrukturnya terlihat bahwa ukuran butir dalam paduan Zr–0,2%Nb–0,5%Fe–0,5%Cr belum seragam di setiap posisi logam paduan.

Kekerasan ingot paduan Zr–0,5%Nb–0,5%Fe–0,5%Cr hasil leburan adalah 269 VHN, setelah β -*quenching* naik menjadi 338 VHN, kemudian menurun menjadi 299 VHN setelah homogenisasi (Tabel 2). Kekerasan paduan Zr–0,5%Nb–0,5%Fe–0,5%Cr lebih tinggi dibandingkan kekerasan paduan Zr–0,2%Nb–0,5%Fe–0,5%Cr. Hal ini membuktikan bahwa semakin tinggi kandungan Nb dalam paduan maka semakin tinggi kekerasan paduan tersebut.

Kekerasan ingot paduan Zr–0,8%Nb–0,5%Fe–0,5%Cr hasil leburan adalah 274 VHN, setelah β -*quenching* naik menjadi 340 VHN, kemudian menurun menjadi 316 VHN setelah homogenisasi. Kekerasan ingot hasil peleburan, β -*quenching* dan homogenisasi dari paduan Zr–0,8%Nb–0,5%Fe–0,5%Cr relatif sama dengan paduan Zr–0,5%Nb–0,5%Fe–0,5%Cr tetapi lebih tinggi dibandingkan paduan Zr–0,2%Nb–0,5%Fe–0,5%Cr. Hal ini menunjukkan bahwa proses homogenisasi terhadap paduan Zr–0,8%Nb–0,5%Fe–0,5%Cr belum sempurna. Fakta tersebut diperkuat dengan mikrostruktur paduan Zr–0,8%Nb–0,5%Fe–0,5%Cr yang ditunjukkan oleh Gambar 3. Pada gambar tersebut terlihat bahwa butir-butir dari mikrostruktur paduan Zr–0,8%Nb–0,5%Fe–0,5%Cr lebih tidak seragam bila dibandingkan butir-butir dari paduan Zr–0,5%Nb–0,5%Fe–0,5%Cr dan Zr–0,2%Nb–0,5%Fe–0,5%Cr.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan karakterisasi mikrostruktur, komposisi kimia dan kekerasan terhadap ingot paduan Zr–Nb–Fe–Cr, dapat disimpulkan bahwa:

1. Mikrostruktur ingot paduan Zr–0,2%Nb–0,5%Fe–0,5%Cr secara kualitatif mempunyai struktur butir dengan ukuran relatif besar dibandingkan ingot paduan Zr–0,5%Nb–0,5%Fe–0,5%Cr dan Zr–0,8%Nb–0,5%Fe–0,5%Cr. Hal ini membuktikan Nb merupakan unsur penginti yang dapat memperhalus ukuran butir paduan Zr–Nb–Fe–Cr.
2. Setelah perlakuan β -*quenching* dan homogenisasi, komposisi Nb dalam paduan Zr–0,2%Nb–0,5%Fe–0,5%Cr adalah $(0,16 \pm 0,02)\%$; paduan Zr–0,5%Nb–0,5%Fe–0,5%Cr adalah $(0,41 \pm 0,07)\%$; dan paduan Zr–0,8%Nb–0,5%Fe–0,5%Cr adalah $(0,64 \pm 0,12)\%$.
3. Setelah perlakuan β -*quenching* dan homogenisasi, paduan Zr–0,8%Nb–0,5%Fe–0,5%Cr memiliki kekerasan (= 316 VHN) lebih tinggi dibanding Zr–0,5%Nb–0,5%Fe–0,5%Cr (= 299 VHN) dan Zr–0,2%Nb–0,5%Fe–0,5%Cr (= 297 VHN).
4. Paduan Zr–0,2%Nb–0,5%Fe–0,5%Cr secara kualitatif lebih homogen dibandingkan paduan Zr–0,5%Nb–0,5%Fe–0,5%Cr dan Zr–0,8%Nb–0,5%Fe–0,5%Cr.

-
5. Semakin besar kadar Nb yang terdapat dalam paduan Zr–Nb–Fe–Cr, maka ukuran butirnya relatif lebih kecil, kekerasannya lebih tinggi dan homogenisasi lebih sulit dicapai.

V. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Isfandi, A.Md., yang telah membantu preparasi metalografi dan uji kekerasan; dan Drs. Yusuf Nampira, M.T., yang telah membantu dalam pengujian komposisi kimia paduan Zr–Nb–Fe–Cr.

VI. PUSTAKA

1. PARFENOV, B.G., Corrosion of Zirconium and Zirconium Alloys, IPST Press, Jerusalem, 1969, pp.7-34.
2. LAMARSH, J.R., Introduction to Nuclear Engineering, Addison-Wesley, New York, 1983, pp.644-647.
3. GROS, J.P., and WADIER, J.F., “Precipitate Growth Kinetics in Zircaloy-4”, J. of Nuclear Materials, Vol. 172, North-Holland, 1990, pp.85-95.
4. HARINI S., dan SUNGKONO, “Distribusi Pertumbuhan Presipitat Zircaloy-4 Pada Temperatur 700-900°C”, Prosiding PIDBBN III, Jakarta, 1997, hal.217-228.
5. SMALLMAN, R.E., Modern Physical Metallurgy, Butterworth, London, 1981.
6. VANDER VOORT, G.F., Metallography: Principle and Practice, McGraw-Hill, New York, 1984, pp.60-124.
7. EWING, G. W., Instrumental Methods of Chemical Analysis, McGraw-Hill, New York, 1985, pp.204-212.
8. KALPAKJIAN, S., Manufacturing Engineering and Technology, Addison-Wesley, Massachusset, 1995, pp.78-82.
9. AGRAWAL, B. K., Introduction to Engineering Materials, Tata McGraw-Hill, New Delhi, 2000, pp.55-61.