

**PENGARUH PERLAKUAN PANAS
PADA REGANGAN DAN TEGANGAN SISA
PADUAN Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe**

Sugondo, Futichah

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir – BATAN
Kawasan PUSPIPTEK, Tangerang 15314

ABSTRAK

PENGARUH PERLAKUAN PANAS PADA REGANGAN DAN TEGANGAN SISA PADUAN Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe. Telah dilakukan karakterisasi pengaruh perlakuan panas pada regangan dan tegangan sisa paduan Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe dengan metode difraksi sinar-X. Sintesa paduan menggunakan teknik peleburan. Sampel dipanaskan pada suhu 1100 °C selama 2 jam, diikuti *quenching* dalam air. Kemudian sampel dibersihkan dan dipanaskan pada suhu 500, 600, 700 dan 750 °C selama 2 jam. Sampel dipoles sampai *grid* 1200 *mesh* untuk menghilangkan oksida selama proses berlangsung. Identifikasi kristal dilakukan dengan difraksi sinar-X. Pembuatan difraktogram menggunakan alat JEOL-DX-GERP-12 dengan spesifikasi sebagai berikut: *tube* Cu, *filter* Ni, tegangan 36 kV, arus 20 MA dan laju 2 °/menit. Transformasi pemanasan Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe cenderung mengarah pada bidang (002) dan (101). Pada suhu pemanasan 750 °C, bidang (110) dan (103) dalam Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe lenyap. Pemilihan suhu pemanasan Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe dapat ditentukan dengan mengidentifikasi jarak kisi bidang (002), (101) dan (102) sampel uji. Jika jarak kisi sama dengan jarak kisi sampel referensi berturut-turut 2,575; 2,460; dan 1,894 Å, maka suhu pemanasan sudah tepat. Pemanasan paduan Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe menghasilkan tarikan pada arah radial dan kompresi pada arah aksial. Suhu pemanasan paduan Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe pada 700 °C menghasilkan regangan dan tegangan sisa maksimum. Harga regangan dan tegangan sisa minimum menunjukkan ketepatan suhu pemanasan Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe.

KATA KUNCI: Regangan sisa, Tegangan sisa, Paduan Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe, Difraksi sinar-X, Zircaloy, PWR

ABSTRACT

EFFECT OF HEAT TREATMENT ON MICROSTRAIN AND MICROSTRESS OF Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe ALLOY. Characterization of heat treatment effect on microstrain and microstress of Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe alloy had been conducted using X-ray diffraction. The alloy was prepared using arc melting furnace. The samples were heated at 1100 °C for 2 hours, followed by quenching in water. Afterward the samples were cleaned and heated at 500, 600, 700 and 750 °C for 2 hours. The samples were polished using grid 1200 mesh to eliminate the oxide which was formed during the process. The samples were exposed to X-ray diffraction to identify the parameter of crystals. The diffractograms were obtained from JEOL-DX-GERP-12 using Cu target, Ni filter, voltage 36 kV, current 20 MA, and speed 2 °/min. The heating transformation of Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe tended towards (002) and (101) planes. The (110) and (103) planes of Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe were disappeared by heating at temperature of 750 °C. Determination of heating temperature of Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe could be determined by identifying the lattice spacings of (002), (101), and (102) planes. If the lattice spacings match those of

the reference, which are 2.575, 2.460, and 1.894 Å respectively, the heating temperature is correct. Heating of Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe alloy resulted in tension in radial direction and compression in axial direction. The heating temperature of Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe alloy at 700 °C yielded maximum strain and residual stress. Minimum strain and residual stress indicated correct heating temperature of Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe alloy.

FREE TERMS: Microstrain, Microstress, Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe alloy, X-ray diffraction, Zircaloy, PWR

I. PENDAHULUAN

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

Zircaloy masih dikembangkan untuk bahan struktur dan kelongsong pada reaktor air bertekanan (PWR). Pengembangan bahan struktur dan kelongsong bertujuan untuk mendapatkan bahan dengan ketahanan korosi dan kekuatan mekanik tetap baik pada saat iradiasi di reaktor. Peningkatan kadar Fe sampai 1% dapat menaikkan ketahanan korosi dan kekuatan mekanik^[1]. Telah disintesa paduan Zr-Sn-Nb-Fe^[2] dan diperoleh hasil paduan yang baik yaitu tidak ada porositas, mampu *quenching* dan mampu rol. Paduan multi komponen Zr-Sn-Nb-Fe dikembangkan untuk bahan kelongsong dan bejana bertekanan yang tahan korosi^[3]. Paduan ini mengandung senyawa partikel intermetalik dalam bentuk $Zr(Nb,Fe)_2$ dan $(Zr,Nb)_3Fe$.

Regangan dan tegangan sisa adalah regangan dan tegangan yang tinggal dalam bahan dengan tidak adanya beban dari luar. Regangan dan tegangan sisa diperoleh akibat suatu proses pengerjaan panas, pengerjaan dingin, peleburan dan perlakuan panas. Pada zircaloy, karakteristik ini sangat penting karena sifatnya yang anisotropis yang berpengaruh pada penggunaan bahan tersebut, terutama pada *creep* dan *growth* pada saat dalam reaktor.

Paduan Zr-Sn-Nb-Fe hasil sintesa tersebut belum dilakukan karakterisasi regangan dan tegangan sisanya. Berdasarkan uraian tersebut, maka dalam penelitian ini dilakukan analisis dengan difraksi sinar-X yang bertujuan mendapatkan data regangan dan tegangan sisa akibat perbedaan suhu pemanasan dari paduan Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe.

II. TEORI

Regangan dan tegangan sisa dapat diidentifikasi dengan difraksi sinar-X. Spektrum intensitas versus sudut Bragg (θ) sinar-X disebut sebagai difraktogram. Sifat puncak difraktogram mempunyai dua karakteristik jika dibandingkan dengan puncak difraktogram kristal tunggal, yaitu pergeseran puncak dan pelebaran puncak^[4].

Pergeseran puncak dapat diterangkan sebagai berikut. Jika suatu bahan dikenakan gaya tarik (F) seluas A , maka pertama mengalami regangan elastis (ϵ). Berdasarkan panjangnya (L), maka regangan ke arah tarikan (ϵ_y) adalah rasio perubahan panjang ($L_1 - L_0$) terhadap panjang awal (L_0).

$$\varepsilon_y = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \quad (1)$$

Persamaan dasar elastis adalah tegangan (σ) sebanding dengan tegangan luluh (*modulus Young*, E) dan regangan elastis (ε). Korelasi ini untuk arah tarikan (y) adalah:

$$\sigma_y = E\varepsilon_y \quad (2)$$

Jika bahan berbentuk silinder mempunyai diameter (D) dan mengalami regangan ke arah (Z) yaitu ke arah tangensial, maka regangan elastis tersebut adalah sebagai berikut:

$$\varepsilon_z = \frac{D_1 - D_0}{D_0} \quad (3)$$

dimana D_0 adalah diameter awal dan D_1 adalah diameter pada saat mengalami regangan ε_z . Jika regangannya homogen atau isotropis, maka regangan ke arah tangensial (Z) sama dengan regangan ke arah radial (X) dan korelasinya dengan regangan ke arah aksial yaitu (Y) adalah sebagai berikut:

$$\varepsilon_z = \varepsilon_x = -\nu\varepsilon_y \quad (4)$$

Perlu diperhatikan bahwa sebesar apapun tegangan yang diberikan hanya mengubah sedikit jarak kisi kristal (d) dan regangan ke arah (Z) sebesar:

$$\varepsilon_z = \frac{d_1 - d_0}{d_0} \quad (5)$$

Kembali ke persamaan (2) maka diperoleh:

$$\sigma_y = \frac{-E}{\nu} \frac{(d_1 - d_0)}{d_0} = \frac{-E}{\nu} \frac{(\Delta d)}{d_0} \quad (6)$$

dimana ν adalah rasio Poisson dan E adalah kekuatan luluh. Jika dihubungkan dengan difraktogram sinar-X (intensitas versus sudut Bragg), maka Δd adalah pergeseran puncak maksimum difraktogram. Selanjutnya bahwa σ_y disebut tegangan mikro sisa (*residual microstress*) dan ε_y adalah regangan makro sisa (*residual macrostrain*) ke arah uni aksial.

Pelebaran puncak difraktogram disebabkan oleh regangan sisa tak merata yaitu akibat terbentuknya sub-butir, butir melengkung dan adanya dislokasi. Regangan sisa tersebut disebabkan oleh tegangan yang berada dalam butir. Pelebaran puncak (B), sudut Bragg (θ) dan jarak kisi (d) menghasilkan korelasi sebagai berikut:

$$B = \frac{-2d \tan \theta}{d_0} \quad (7)$$

Harga ($\Delta d/d$) meliputi tarikan dan pengepresan. Berdasarkan persamaan (2), diperoleh:

$$\sigma = \frac{EB}{4 \tan \theta} \quad (8)$$

dimana segmen $\frac{B}{4 \tan \theta}$ adalah regangan sisa mikro.

Dari argumentasi tersebut diperoleh hipotesis bahwa jika terjadi pergeseran dan pelebaran puncak difraktogram maka terjadi perubahan jarak kisi kristal, tegangan sisa dan regangan butir sisa yang bersifat anisotropis.

III. TATA KERJA

3.1. Cara Kerja

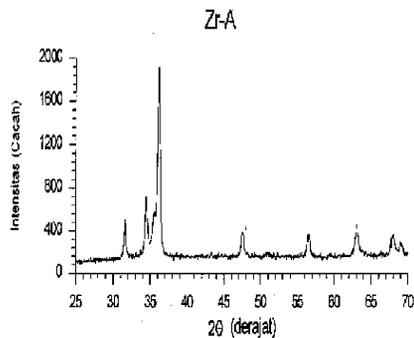
Serbuk Zr, Sn, Nb dan Fe ditimbang dengan berat Zr = 14,5494 g; Sn = 0,1499 g; Nb = 0,1501 g; dan Fe = 0,1506 g. Kemudian serbuk dicampur menggunakan *V-mixer* selama 2 jam sebelum dilakukan pengompakan sehingga diperoleh pelet mentah. Sintesa paduan dilakukan menggunakan teknik peleburan busur tunggal dimana diperoleh ingot dengan komposisi Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe. Ingot dipanaskan pada suhu 1100 °C selama 2 jam diikuti *quenching* dalam air. Setelah perlakuan *quenching*, sampel dipotong dengan pisau intan (*diamond blade*) dengan ukuran $\pm 5 \times 2 \times 10$ mm. Selanjutnya sampel dipanaskan pada suhu 500, 600, 700 dan 750 °C selama 2 jam.

3.2. Difraksi sinar-X

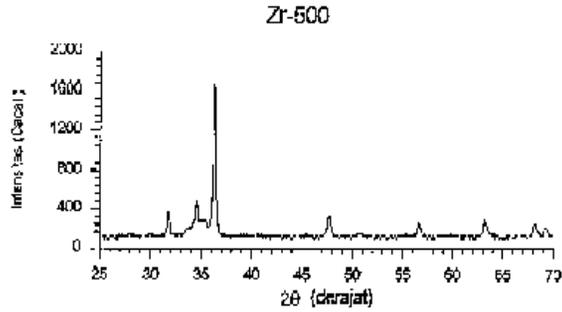
Sampel dipoles sampai grid 1200 mesh untuk menghilangkan oksida selama proses berlangsung. Pembuatan difraktogram dilakukan menggunakan alat JEOL-DX-GERP-12 dengan spesifikasi sebagai berikut: *tube* Cu, *filter* Ni, tegangan 36 kV, arus 20 MA dan laju 2 °/menit.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

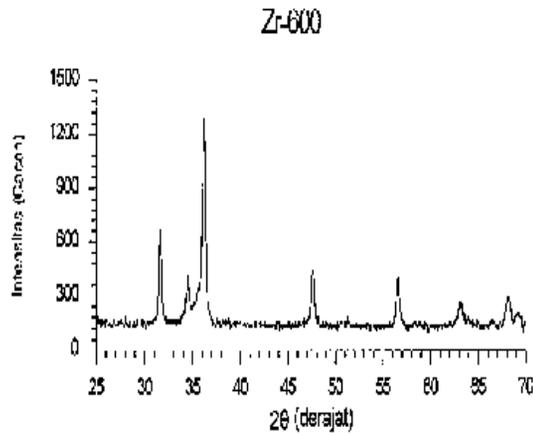
Hasil difraksi dapat dilihat pada Gambar 1 sampai 5. Data pengukuran dan perhitungan regangan dan tegangan sisa diberikan pada Tabel 1 sampai 5. Keterangan: HKL = bidang heksagonal, puncak (s), 2θ = sudut Bragg pada intensitas maksimum, puncak ®, 2θ = sudut Bragg pada intensitas maksimum sampel referensi, d = jarak antar kisi bidang kristal (Å), d_0 = jarak antar kisi bidang kristal sampel referensi (Å), Δd = pergeseran sudut Bragg relatif terhadap sampel referensi (Å), ϵ_z = regangan sisa arah radial, ϵ_y = regangan sisa arah aksial, σ_z = tegangan sisa arah radial (MPa) dan σ_y = tegangan sisa arah aksial (MPa).



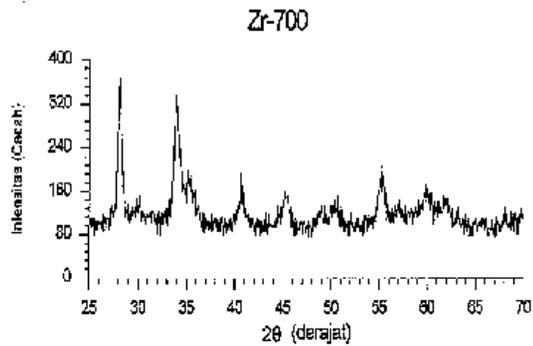
Gambar 1. Difraktogram sinar-X dari paduan Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe hasil *quenching*



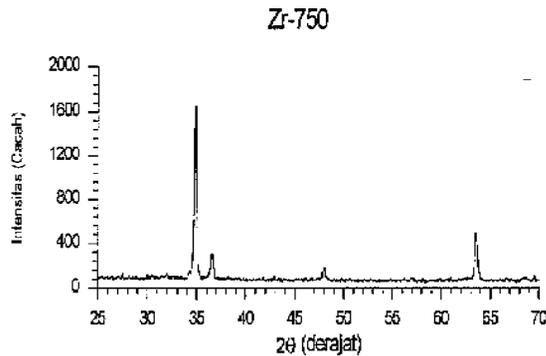
Gambar 2. Difraktogram sinar-X dari paduan Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe hasil pemanasan 500 °C



Gambar 3. Difraktogram sinar-X dari paduan Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe hasil pemanasan 600 °C



Gambar 4. Difraktogram sinar-X dari paduan Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe hasil pemanasan 700 °C



Gambar 5. Difraktogram sinar-X dari paduan Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe pemanasan 750 °C

Difraktogram Gambar 1 sampai 5 menunjukkan puncak sudut Bragg yang dapat dikonversi ke parameter jarak kisi dan bidang kisi. Dengan membandingkan jarak kisi sampel uji dan sampel standar maka diperoleh Δd . Selanjutnya data tersebut dimasukkan ke dalam persamaan (2) sampai (6) sehingga diperoleh regangan dan tegangan sisa yang dapat dilihat pada Tabel 1 sampai Tabel 5.

Tabel 1. Regangan sisa dan tegangan sisa Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe hasil *quenching*

HKL	Puncak (s)	Puncak (R)	d	do	Δd	ϵ_z	σ_z	ϵ_y	σ_y
002	34,40	34,82	2,605	2,575	0,030	0,012	4,189	-0,034	-11,969
101	36,10	36,49	2,486	2,460	0,026	0,010	3,745	-0,030	-10,699
102	47,55	47,86	1,911	1,899	0,012	0,006	2,220	-0,018	-6,342
110	56,45	56,78	1,629	1,620	0,009	0,005	1,923	-0,015	-5,494
103	63,00	63,50	1,474	1,464	0,010	0,007	2,547	-0,020	-7,276

Tabel 2. Regangan sisa dan tegangan sisa Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe hasil pemanasan 500 °C

HKL	Puncak (s)	Puncak (R)	d	do	Δd	ϵ_z	σ_z	ϵ_y	σ_y
002	34,55	34,82	2,594	2,575	0,019	0,007	2,664	-0,021	-7,611
101	36,25	36,49	2,476	2,460	0,016	0,006	2,308	-0,018	-6,594
102	47,65	47,86	1,907	1,899	0,008	0,004	1,505	-0,012	-4,300
110	56,60	56,78	1,625	1,620	0,005	0,003	1,042	-0,008	-2,976
103	63,15	63,50	1,471	1,464	0,007	0,005	1,766	-0,014	-5,046

Tabel 3. Regangan sisa dan tegangan sisa Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe hasil pemanasan 600 °C

HKL	Puncak (s)	Puncak (R)	d	do	Δd	ϵ_z	σ_z	ϵ_y	σ_y
002	34,45	34,82	2,601	2,575	0,027	0,010	3,676	-0,029	-10,503
101	36,15	36,49	2,483	2,460	0,023	0,009	3,266	-0,026	-9,330
102	47,55	47,86	1,911	1,899	0,012	0,006	2,220	-0,018	-6,342
110	56,50	56,78	1,627	1,620	0,007	0,005	1,637	-0,013	-4,676
103	63,15	63,50	1,471	1,464	0,007	0,005	1,766	-0,014	-5,046

Tabel 4. Regangan sisa dan tegangan sisa Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe hasil pemanasan 700 °C

HKL	Puncak (s)	Puncak (R)	d	do	Δd	ϵ_z	σ_z	ϵ_y	σ_y
002	33,95	34,82	2,638	2,575	0,064	0,025	8,834	-0,071	-25,241
101	35,15	36,49	2,551	2,460	0,091	0,037	13,177	-0,105	-37,649
102	49,95	47,86	1,824	1,899	-0,074	-0,039	-14,006	0,112	40,017
110	57,00	56,78	1,614	1,620	-0,006	-0,004	-1,250	0,010	3,572
103	63,25	63,50	1,469	1,464	0,005	0,004	1,278	-0,010	-3,653

Tabel 5. Regangan sisa dan tegangan sisa Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe hasil pemanasan 750 °C

HKL	Puncak (s)	Puncak (R)	d	do	Δd	ϵ_z	σ_z	ϵ_y	σ_y
002	34,80	34,82	2,576	2,575	0,001	0,000	0,168	-0,001	-0,480
101	36,50	36,49	2,460	2,460	0,000	0,000	-0,072	0,001	0,206
102	47,55	47,86	1,894	1,899	-0,005	-0,003	-0,939	0,008	2,683

Notasi

Sebelum melakukan pembahasan terlebih dahulu dijelaskan notasi yang digunakan. (HKL) adalah bidang-bidang heksagonal yang tidak ditulis dalam bentuk (HkiL), $i = -(H+K)$, dengan tujuan menyederhanakan penulisan. Puncak (s) adalah sudut Bragg pada intensitas maksimum untuk sampel. Puncak (R) adalah sudut Bragg pada intensitas maksimum untuk kristal tunggal yang digunakan sebagai referensi. d adalah jarak antar kisi kristal pada sampel. d_0 adalah jarak antar kisi kristal pada kristal tunggal. Δd pergeseran sudut Bragg relatif terhadap referensi. ϵ_y regangan sisa arah aksial dan ϵ_z regangan sisa normal terhadap aksial. FWHM (*Full Width of Half Maximum*) adalah lebar setengah puncak.

Proses *quenching* diikuti pemanasan pada suhu 500 °C

Perubahan jarak kisi pada sampel hasil *quenching* kemudian diikuti pemanasan 500 °C adalah menjadi lebih pendek. Jarak kisi hasil *quenching* untuk bidang (002), (101), (102), (110) dan (103) berturut-turut adalah 2,605; 2,486; 1,911; 1,629; dan 1,474 Å. Setelah pemanasan 500 °C jarak kisi bidang-bidang tersebut adalah 2,594; 2,476; 1,907; 1,625; dan 1,471 Å. Fakta ini dapat dijelaskan sebagai berikut. Pada saat *quenching* sebagian fasa- β belum sempurna

mengalami transformasi menjadi fasa- α . Fungsi unsur niobium (Nb) dalam zircaloy merupakan penstabil fasa- β ^[5]. Selain itu disebutkan pula bahwa *quenching* dalam air dari daerah fasa- β (900 – 1600 °C), unsur Nb membentuk senyawa intermetalik dan setelah pemanasan pada suhu medium senyawa intermetalik menuju batas butir. Jadi perubahan jarak kisi tersebut kemungkinan disebabkan oleh perubahan senyawa intermetalik Zr-Nb yang menuju batas butir.

Proses *quenching* diikuti pemanasan pada suhu 500, 600 dan 700 °C

Peningkatan suhu pemanasan dari 500, 600 dan 700 °C mengakibatkan penambahan panjang jarak kisi bidang (002) dan (101). Jarak kisi (002) hasil pemanasan pada suhu tersebut berturut-turut adalah 2,594; 2,601; dan 2,638 Å. Sedangkan jarak kisi (101) berturut-turut adalah 2,476; 2,483; dan 2,551 Å. Penjelasan data ini adalah sebagai berikut.

Sistem heksagonal zirkonium cenderung mempertahankan rasio c/a sebesar 1,593, $a = 0,323$ Å dan $c = 0,515$ Å^[6]. Disebutkan pula bahwa koefisien ekspansi termal arah a yaitu arah [110] sebesar $5,2 \times 10^{-6}$ K⁻¹ dan arah c sebesar $10,4 \times 10^{-6}$ K⁻¹. Koefisien termal ini memberikan indikasi bahwa sistem heksagonal selalu mempertahankan konsistensi rasio c/a . Sebagai akibatnya transformasi mengarah pada c dan a sehingga menghasilkan bidang basal (002) dan bidang piramidal (101).

Berdasarkan fakta hasil pengukuran dan pustaka berarti sistem yang aktif pada perlakuan panas adalah bidang piramidal dan basal. Dengan demikian proses peleburan, *quenching* dan pemanasan, mengakibatkan terjadinya proses re-kristalisasi dan pertumbuhan butir. Atas dasar argumentasi koefisien termal maka proses pemanasan akan menghasilkan tarikan (*tension*) pada bidang basal dan bidang piramidal. Jadi pada interval suhu pemanasan 500, 600 dan 700 °C terjadi transformasi orientasi kristal atau penataan ulang susunan kristal. Proses transformasi dengan tarikan ke arah basal dan piramidal menghasilkan bidang basal dan piramidal yang berakibat pada bertambah panjangnya jarak kisi.

Bidang kisi (102) dan (103) merupakan kristalit dari (101). Jarak kisi (102) pada interval suhu pemanasan 500, 600 dan 700 °C berturut-turut adalah 1,907; 1,911; dan 1,824 Å. Pemanasan pada suhu 500 dan 600 °C nampak belum memberikan energi yang cukup untuk memutar bidang (102) mengarah pada (101). Setelah pemanasan pada suhu 700 °C baru terdapat cukup energi untuk memutar atau menata ulang (102) sehingga menghasilkan jarak kisi lebih kecil.

Jarak kisi bidang (103) pada interval suhu pemanasan 500, 600 dan 700 °C berturut-turut adalah 1,471; 1,471; dan 1,469 Å. Jarak kisi bidang (103) sampai pada suhu pemanasan 700 °C praktis tidak mengalami perubahan. Jadi sampai pada suhu 700 °C belum terdapat cukup energi untuk memutar bidang ini sehingga terjadi penataan ulang mengikuti arah piramidal dan basal.

Jarak kisi bidang (110) dalam interval suhu pemanasan 500, 600 dan 700 °C berturut-turut adalah 1,625; 1,627; dan 1,614 Å. Transformasi pada bidang kisi (110) adalah *twin* (*twinning*)^[6]. Terlihat dari data bahwa suhu pemanasan 500 dan 600 °C tidak cukup untuk mentransformasi atau merotasi bidang kisi (110), dan terbukti tidak mengubah bidang kisi. Tetapi pada suhu pemanasan 700 °C jarak kisi berkurang sedikit dari 1,627 Å menjadi 1,614 Å. Jadi proses *twin* tidak begitu aktif pada suhu pemanasan antara 500 sampai 700 °C.

Proses *quenching* diikuti pemanasan pada suhu 750 °C

Suhu pemanasan pada 750 °C ini sangat berbeda pengaruhnya terhadap bidang kisi jika dibandingkan dengan suhu pemanasan pada 500, 600 dan 700 °C. Dalam pembahasan ini, hasil pemanasan pada 750 °C menghasilkan bidang kisi (002), (101) dan (102). Sedangkan bidang kisi (110) dan (103) lenyap. Berarti bidang (103) mengalami transformasi, yang paling mungkin adalah *slip*, mengarah pada piramidal dan basal. Bidang kisi (110) mengalami transformasi *twin* menuju piramidal dan basal.

Jarak kisi bidang (002) adalah sebesar 2,638 Å pada pemanasan 700 °C dan sebesar 2,576 Å pada pemanasan 750 °C. Berarti pemanasan pada suhu 750 °C sudah tepat untuk mentransformasi bidang (002) mengingat jarak kisi sudah sama dengan sampel referensi yang mempunyai jarak kisi bidang (002) sebesar 2,575 Å. Begitu juga jarak kisi bidang (101) sudah sama dengan yang ada pada sampel referensi yaitu sebesar 2,460 Å. Jadi suhu pemanasan 750 °C sudah baik untuk transformasi bidang (101).

Sebaliknya jarak kisi bidang (102) mengalami kenaikan jika dibandingkan dengan suhu pemanasan 700 °C. Hasil pemanasan 700 °C jarak kisi bidang (102) sebesar 1,824 Å dan hasil pemanasan 750 °C sebesar 1,894 Å. Tetapi kenaikan jarak kisi bidang (102) ini mengarah pada kondisi normal yaitu dengan jarak kisi sebesar 1,899 Å pada sampel referensi. Jadi suhu pemanasan 750 °C juga sudah tepat untuk transformasi bidang kisi (102).

REGANGAN DAN TEGANGAN SISA

Proses *quenching* diikuti pemanasan 500 °C

Dari Tabel 1 dan Tabel 2 dapat dilihat bahwa regangan sisa hasil proses *quenching* lebih besar jika dibandingkan dengan hasil pemanasan 500 °C. Regangan sisa arah radial (ϵ_z) hasil proses *quenching* berkisar antara 0,007 (0,7%) sampai 0,012 (1,2%). Regangan sisa arah radial (ϵ_y) hasil proses *quenching* berkisar antara -0,020 (2,0%) sampai -0,034 (3,4%). Regangan sisa arah radial (ϵ_z) hasil proses pemanasan 500 °C berkisar antara 0,005 (0,5%) sampai 0,007 (0,7%). Regangan sisa arah radial (ϵ_y) hasil proses pemanasan 500 °C berkisar antara -0,014 (1,4%) sampai -0,021 (2,1%). Regangan sisa pada arah radial bertanda positif berarti elongasi sedangkan regangan sisa arah aksial bertanda negatif berarti pengkerutan. Regangan sisa bidang (002) adalah yang paling besar, diikuti regangan sisa bidang (101). Telah diuraikan sebelumnya bahwa transformasi mengarah pada piramidal dan basal. Disamping itu pada transformasi pada *quenching* masih ada sisa fasa- β dalam fasa- α . Pada fasa- β sistem kristalnya bcc sedangkan pada fasa- α sistem kristalnya heksagonal. Berarti arah orientasi kristalnya tidak paralel sehingga menyebabkan saling menekan atau menarik satu sama lain. Setelah pemanasan 500 °C, terjadi pemulihan yang berarti transformasi orientasi kristal. Bidang (102) dan (103) merupakan kristalit dari (101) maka regangan sisa bidang (102) dan (103) lebih kecil dibandingkan regangan sisa bidang (101). Sedangkan regangan sisa bidang (110) lebih kecil dibandingkan (101) karena transformasinya mengikuti mekanisme *twin* bukan merupakan mayoritas mekanisme sistem transformasi.

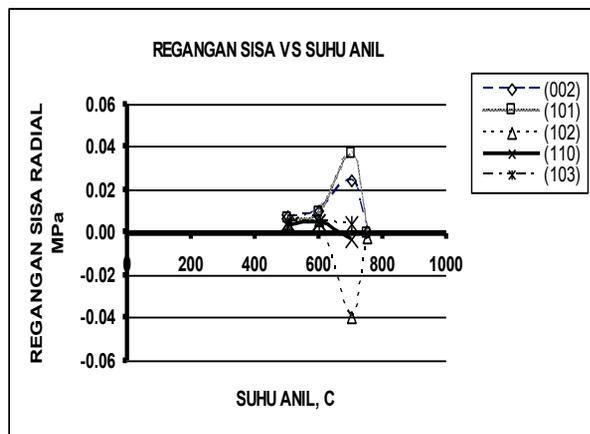
Regangan sisa arah aksial (ϵ_z) atau arah longitudinal lebih besar jika dibanding arah radial (ϵ_y) atau transversal. Berdasarkan data ekspansi panas, koefisien ekspansi panas arah c lebih besar jika dibandingkan dengan koefisien ekspansi panas arah a. Hal ini terjadi karena memenuhi konstansi rasio c/a sebesar 1,593.

Proses pemanasan pada suhu 500, 600, 700 dan 750 °C

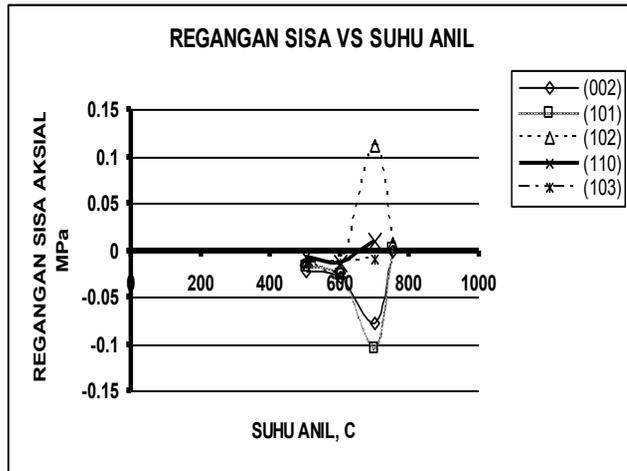
Regangan sisa untuk bidang (002) pada interval pemanasan antara suhu 500 sampai 700 °C meningkat dan berkurang pada pemanasan 750 °C atau mendekati nol (Tabel 2 sampai Tabel 5). Regangan sisa paling besar hasil pemanasan 700 °C yaitu sebesar 0,025 (2,5%) untuk ϵ_z dan -0,071 (7,1%) untuk ϵ_y , sebaliknya paling kecil hasil pemanasan 750 °C yaitu sebesar 0,000 (0,0%) untuk ϵ_z dan -0,001 (0,1%) untuk ϵ_y (Gambar 6 dan Gambar 7).

Tegangan sisa untuk bidang (002) pada interval pemanasan antara suhu 500 sampai 700 °C meningkat dan berkurang pada pemanasan 750 °C (Tabel 2 sampai Tabel 5). Tegangan sisa paling besar hasil pemanasan 700 °C yaitu sebesar 8,834 MPa untuk σ_z dan -25,241 MPa untuk σ_y , sebaliknya paling kecil hasil pemanasan 750 °C yaitu sebesar 0,168 MPa untuk σ_z dan -0,480 MPa untuk σ_y (Gambar 8 dan Gambar 9).

Regangan sisa untuk bidang (101) pada interval pemanasan antara suhu 500 sampai 700 °C meningkat dan berkurang pada pemanasan 750 °C atau mendekati nol (Tabel 2 sampai Tabel 5). Regangan sisa paling besar hasil pemanasan 700 °C yaitu sebesar 0,037 (3,7%) untuk ϵ_z dan -0,105 (10,5%) untuk ϵ_y , sebaliknya paling kecil hasil pemanasan 750 °C yaitu sebesar 0,000 (0,0%) untuk ϵ_z dan -0,001 (0,1%) untuk ϵ_y (Gambar 6 dan Gambar 7).

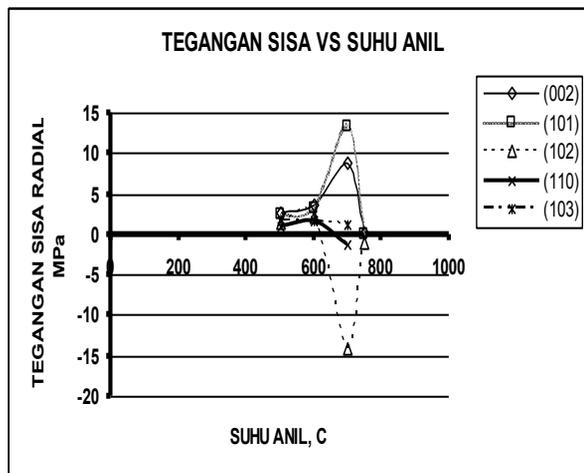


Gambar 6. Pengaruh suhu pemanasan pada regangan sisa ϵ_z paduan Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe.

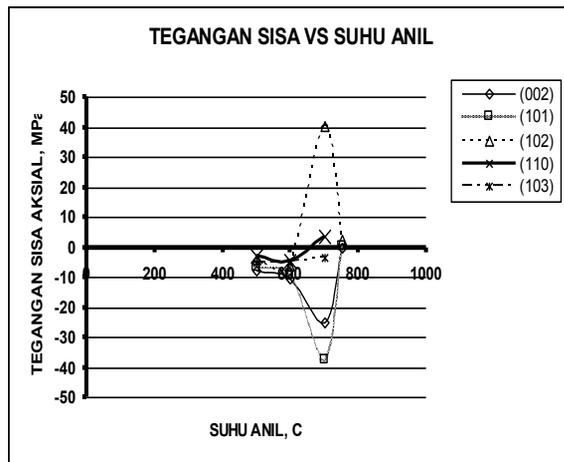


Gambar 7. Pengaruh suhu pemanasan pada regangan sisa ϵ_y paduan Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe

Tegangan sisa untuk bidang (101) pada interval pemanasan antara suhu 500 sampai 700 °C meningkat dan berkurang pada pemanasan 750 °C (Tabel 2 sampai Tabel 5). Tegangan sisa paling besar hasil pemanasan 700 °C yaitu sebesar 13,177 MPa untuk σ_z dan -37,649 MPa untuk σ_y , sebaliknya paling kecil hasil pemanasan 750 °C yaitu sebesar -0,072 MPa untuk σ_z dan 0,206 MPa untuk σ_y . Di sini terjadi perubahan sifat tegangan dari tarikan menjadi kompresi. Hal ini mungkin disebabkan lenyapnya bidang kisi (110) dan (103) yang semula tidak aktif berbalik menjadi aktif menekan bidang (101). Dengan demikian lenyapnya bidang (110) dan (103) mengarah pada piramidal (Gambar 8 dan Gambar 9).



Gambar 8. Pengaruh suhu pemanasan pada tegangan sisa σ_z paduan Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe



Gambar 9. Pengaruh suhu pemanasan pada tegangan sisa σ_y paduan Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe

Regangan sisa untuk bidang (102) pada interval pemanasan antara suhu 500 sampai 700 °C meningkat dan berkurang pada pemanasan 750 °C atau mendekati nol (Tabel 2 sampai Tabel 5). Regangan sisa paling besar hasil pemanasan 700 °C yaitu sebesar -0,039 (3,9%) untuk ε_z dan 0,112 (11,2%) untuk ε_y , sebaliknya paling kecil hasil pemanasan 750 °C yaitu sebesar -0,003 (0,3%) untuk ε_z dan 0,008 (0,8%) untuk ε_y (Gambar 6 dan Gambar 7).

Tegangan sisa untuk bidang (102) pada interval pemanasan antara suhu 500 sampai 700 °C meningkat dan berkurang pada pemanasan 750 °C (Tabel 2 sampai Tabel 5). Tegangan sisa paling besar hasil pemanasan 700 °C yaitu sebesar -14,006 MPa untuk σ_z dan 40,017 MPa untuk σ_y , sebaliknya paling kecil hasil pemanasan 750 °C yaitu sebesar -0,0939 MPa untuk σ_z dan 2,683 MPa untuk σ_y . Di sini terjadi perubahan sifat tegangan dari tarikan menjadi kompresi, yaitu pada suhu pemanasan 700 °C dan masih tetap pada suhu pemanasan 750 °C. Kisi (102) merupakan kristalitik kisi (101), sehingga kisi (102) merupakan transisi transformasi mengarah pada (101). Hal ini terbukti dengan lenyapnya bidang kisi (110) dan (103) pada suhu pemanasan 750 °C tegangan menurun (Gambar 8 dan Gambar 9).

Regangan sisa untuk bidang (110) pada interval pemanasan antara suhu 500 sampai 700 °C relatif stabil (Tabel 2 sampai Tabel 5). Regangan sisa paling besar hasil pemanasan 600 °C yaitu sebesar 0,005 (0,5%) untuk ε_z dan -0,013 (1,3%) untuk ε_y , sebaliknya paling kecil hasil pemanasan 500 dan 700 °C yaitu sebesar 0,003 (0,3%) dan -0,003 (0,3%) untuk ε_z dan 0,008 (0,8%) pada pemanasan 500 °C untuk ε_y (Gambar 6 dan Gambar 7).

Tegangan sisa untuk bidang (110) pada interval pemanasan antara suhu 500 sampai 700 °C meningkat dan berkurang pada pemanasan 750 °C (Tabel 2 sampai Tabel 5). Tegangan sisa paling besar hasil pemanasan 600 °C yaitu sebesar 1,637 MPa untuk σ_z dan -4,676 MPa untuk σ_y , sebaliknya paling kecil hasil pemanasan 500 °C yaitu sebesar 1,042 MPa untuk σ_z dan -2,976 MPa untuk σ_y . Di sini terjadi perubahan sifat tegangan dari tarikan menjadi kompresi, yaitu pada suhu pemanasan 700 °C. Kisi (110) mengikuti mekanisme transformasi twin dan baru aktif setelah suhu pemanasan 700 °C dan lenyap pada suhu pemanasan 750 °C (Gambar 8 dan Gambar 9).

Regangan sisa untuk bidang (103) pada interval pemanasan antara suhu 500 sampai 700 °C relatif stabil (Tabel 2 sampai Tabel 5), yang hilang pada pemanasan 750 °C (Gambar 6 dan Gambar 7).

Tegangan sisa untuk bidang (103) pada interval pemanasan antara suhu 500 sampai 700 °C stabil, yang dapat dilihat pada Tabel 2 sampai Tabel 5, dan Gambar 8 serta Gambar 9.

V. KESIMPULAN

1. Transformasi pemanasan Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe cenderung mengarah pada bidang (002) dan (101).
2. Pada suhu pemanasan 750 °C bidang (110) dan (103) dalam Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe lenyap.
3. Pemilihan suhu pemanasan Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe dapat ditentukan dengan menyamakan jarak kisi bidang (002), (101) dan (102) sampel uji dengan sampel referensi, berturut-turut 2,575; 2,460; dan 1,894 Å.
4. Pemanasan paduan Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe menghasilkan tarikan pada arah radial dan kompresi pada arah aksial.
5. Suhu pemanasan paduan Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe pada 700 °C menghasilkan regangan dan tegangan sisa maksimum.
6. Harga regangan dan tegangan sisa minimum menunjukkan ketepatan suhu pemanasan Zr-1%Sn-1%Nb-1%Fe.

VI. PUSTAKA

1. LAMBERT, J.D.B., and STRAIN, R., "Oxide Fuels", Vol. 10 A, Materials Science and Technology, VCH, Germany, p.121.
2. THOMAZET, J., and FRAGEMA, "Zirconium Alloy Corrosion Behavior and Development", Technical Committee on Fundamental Aspects of Corrosion of Zirconium Base Alloys in Water Reactor Environments, IAEA, Portland, 11-15 September, 1989, pp.249-256.
3. SUGONDO, JOKO KISWORO, dan SLAMET PRIBADI, "Pengaruh Deformasi Pemanasan Paduan Zr-Sn-Nb-Fe pada Kekerasan dan Mikrostruktur", Prosiding dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan Teknologi Nuklir, Pusat Pengembangan dan Teknologi Nuklir, Pusat Pengembangan Teknologi Maju, P3TM-BATAN, Yogyakarta, 7-8 Agustus 2001, hal.23-132.
4. CULLITY B.D., "X-Ray Diffraction", Addison Wesley, London, England, 1959.
5. WILLAM, S.C.D, and GILBERT, R.W., "Tempered Structure of a Zr-2.5Nb Alloy", J. of Nuclear Materials, Vol.18, 1966, pp.161-166.
6. JAFFEE, R.I., and CAMPBELL, I.E., "The Properties of Zirconium", Report NP-266, in LUSTMAN, B., and KERZE, F.J.R., "The Metallurgy of Zirconium", 1st ed., McGraw-Hill, New York, 1955, p.379.