

ANALISIS FASA KRISTAL TERBENTUK PADA BAHAN GELAS METALIK BERBASIS ZIRKONIUM ANTARA SUHU 440 - 480°C

Fatimatul Munawaroh

Program Studi PGSD, Fakultas Ilmu Pendidikan
Universitas Trunojoyo Madura
Jalan Raya Telang, PO BOX 2 Kamal, Bangkalan, Madura
Telp. (031) 3012792, Faks. (031) 3011506
E-mail : fatim_physics@yahoo.co.id

Triwikantoro

Jurusan Fisika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya
Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111
E-mail : triwi@physics.its.ac.id

INTISARI

Telah dilakukan analisis fasa kristal yang terbentuk pada bahan gelas metalik berbasis zirkonium pada suhu antara 440° - 480°C. Yaitu paduan $Zr_{53.1}Cu_{23}Ni_{18}Al_{5.9}$, $Zr_{65}Cu_{17.5}Ni_{10}Al_{7.5}$ dan $Zr_{69.5}Cu_{12}Ni_{11}Al_{7.5}$ yang dipanaskan di atas suhu kristalisasi (T_x) antara 440° - 480°C selama 1 jam. Sampel diuji difraksi sinar-X (XRD) sebelum dan sesudah dipanaskan untuk mengetahui fasa kristal yang terbentuk. Hasil identifikasi menunjukkan kristal yang terbentuk selama pemanasan terdiri dari ZrO_2 (tetragonal) sebagai fasa dominan serta CuO dan NiO sebagai fasa minor. Selain itu terdapat fasa intermetalik Zr_2Ni pada paduan $Zr_{65}Cu_{17.5}Ni_{10}Al_{7.5}$. Ukuran kristal fasa kristal yang terbentuk dihitung dengan menggunakan persamaan Scherrer. Untuk fasa ZrO_2 tetragonal ukuran kristalnya berkisar antara 10-17 nm, ZrO_2 kubik antara 7-14 nm, CuO antara 14-30 nm, NiO antara 13-16 nm dan Zr_2Ni antara 14-16 nm.

Kata kunci : gelas metalik berbasis zirkonium, pemanasan, suhu kristalisasi (T_x)

I. PENDAHULUAN

Gelas logam atau *bulk metallic glasses* (BMG's) berpotensi dimasa yang akan datang mempunyai banyak aplikasi diberbagai bidang (Mondal dkk., 2007). Hal ini karena susunan atomnya yang tidak kristalin (Neogy dkk., 2004), sehingga mempunyai sifat-sifat yang unggul dibandingkan dengan paduan logam yang lain. Diantara sifat-sifat *bulk metallic glasses* (BMG's) tersebut adalah kekuatan dan kekerasan yang tinggi, batas elastik regangan besar, sifat magnetik yang baik, ketahanan korosi, dan ketahanan pakai pada suhu ruang (Shin dkk., 2006; Zhang dkk., 2007).

Zirkonium dan paduannya merupakan material yang sangat menarik untuk aplikasi dalam industri nuklir. Salah satunya digunakan sebagai kelongsong bahan bakar nuklir (*cladding tube*). Paduan zirkonium dipilih karena bahan ini memiliki sifat tahan korosi terhadap air dan uap air, kekuatan mekaniknya tinggi, luas tampang serap neutronnya rendah dan titik lelehnya tinggi (Zander dan Köster, 2004). Setelah ditemukannya paduan gelas metalik berbasis zirkonium, aplikasinya semakin berkembang. Aplikasi yang lain dari bahan *bulk metallic glasses* (BMG's) meliputi industri pelapisan untuk meningkatkan ketahanan pakai dan korosi, *casing* telpon genggam, pisau bedah, alat-alat olahraga seperti pemukul golf dan raket, dan intan permata (Telford, 2004).

Material nanokristal dengan ukuran butir kurang dari 100 nm adalah material baru yang mendapat perhatian lebih oleh ilmuwan dan komunitas industri selama beberapa dekade. Material nanokristal mampu meningkatkan ketahanan korosi dibandingkan paduan konvensional (mikrokristal). Karena material nanokristal mempunyai rasio volume permukaan yang tinggi dengan adanya jumlah batas butir yang lebih banyak, sehingga difusivitasnya lebih tinggi (Zander dan Köster, 2004). Kelebihan yang lain dari material nanokristal adalah mampu meningkatkan ketahanan oksidasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa material dengan struktur nanokristal berbasis zirkonium mempunyai ketahanan oksidasi lebih tinggi dibandingkan dengan fasa amorfnya (Triwikantoro, 2002, Köster dkk., 2001, Köster dan Jastrow, 2007).

Dalam penelitian ini dilakukan analisis terhadap fasa kristal terbentuk selama pemanasan 1 jam di atas suhu kristalisasi (T_x) yaitu antara 440° - 480°C pada bahan gelas metalik berbasis zirkonium empat komponen $Zr_{53.1}Cu_{23}Ni_{18}Al_{5.9}$, $Zr_{65}Cu_{17.5}Ni_{10}Al_{7.5}$ dan $Zr_{69.5}Cu_{12}Ni_{11}Al_{7.5}$. Tujuan yang diharapkan adalah ukuran kristal yang terbentuk mencapai ukuran nanometer.

II. TINJAUAN PUSTAKA

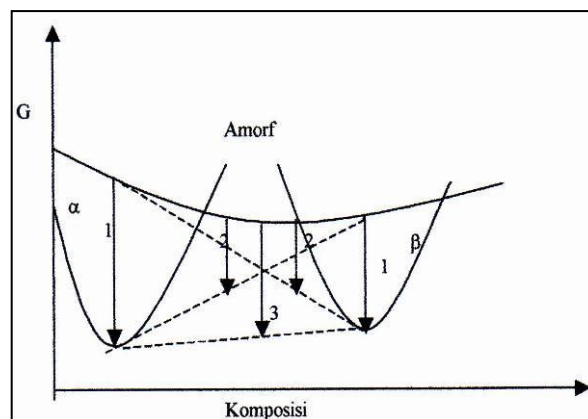
a. Gelas Metalik Berbasis Zirkonium

Gelas logam pertama ditemukan oleh Pol Duwez pada tahun 1957 yaitu paduan $\text{Au}_{80}\text{Si}_{20}$ di Caltech dengan pendinginan cepat yaitu 10^6 K/s. Lelehan logam mencapai suhu transisi gelas tanpa adanya waktu atau energi yang cukup untuk mengkristal, dan memadat menjadi gelas metalik (logam). Sekitar tahun 1990 Akihisa Inoue dan timnya di Universitas Tohoku Jepang menemukan paduan baru gelas metalik yang bisa dibentuk lebih tebal dengan laju pendinginan yang rendah 1-100 K/s dan kemampuan pembentukan gelas atau *Glass-Forming Ability (GFA)* tinggi atau baik (Telford, 2004). Menurut Inoue kriteria empiris untuk kinetika kristalisasi yang rendah, keadaan *supercooled liquid* yang stabil meliputi (a) menggunakan paduan yang terdiri atas tiga atau lebih elemen penyusun, (b) perbedaan ukuran atom elemen penyusun tidak lebih besar dari 12%, dan (c) panas pencampuran antara elemen pembentuk paduan harus negatif ($\Delta G < 0$). Dalam struktur amorf ada beberapa titik/daerah yang perlu diperhatikan yaitu daerah transisi gelas dan transisi kristal. Dengan mengetahui titik transisi gelas dan titik kristalisasi, maka kestabilan struktur yang diinginkan dapat diperhitungkan. Kestabilan struktur dihitung dari selisih T_g dengan T_x ($\Delta T_x = T_x - T_g$). Nilai ΔT_x ini juga menyatakan kemampuan pembentukan gelas (*Glass Forming Ability/GFA*) atau disebut juga sebagai daerah *supercooled liquid*. Semakin besar nilai ΔT_x atau semakin luas daerah *supercooled liquid* maka semakin besar pula kemampuan pembentukan gelasnya (GFA) (Saida dkk., 2000).

b. Kristalisasi

Kristalisasi adalah proses perubahan struktur material dari fasa amorf menjadi kristal. Kristalisasi merupakan proses pembentukan kristal yang terjadi pada saat pembekuan yaitu perubahan dari fasa cair ke fasa padat. Mekanisme kristalisasi dapat terjadi melalui dua tahap, yaitu pengintian dan pertumbuhan kristal. Kristalisasi dapat terjadi dengan pengerjaan dingin maupun pengerjaan panas. Sebagai akibat dari pengerjaan dingin adalah sifat kekerasan, kekuatan tarik dan tahanan listrik akan naik, sedangkan keuletan akan menurun.

Dalam keadaan cair, atom-atom tidak memiliki susunan yang teratur dan mudah bergerak. Dengan berkurangnya suhu, maka energi atom semakin rendah, sehingga atom sulit bergerak, selanjutnya atom mulai mengatur kedudukannya relatif terhadap atom lain. Hal ini terjadi pada daerah relatif dingin yang merupakan daerah awal terjadinya inti kristal. Proses pengintian selanjutnya terjadi pertumbuhan kristal yang berlangsung dari suhu rendah ke suhu yang lebih tinggi. Energi termal yang terus meningkat dapat mengakibatkan pertumbuhan kristal yang terus menerus hingga transformasi akhir, yaitu amorf menjadi kristal (Triwikantoro, 2002). Gambar 1 adalah diagram hipotetik yang menjelaskan fenomena kristalisasi.



Gambar 1. Diagram hipotetik transformasi fasa dari amorf menuju fasa kristal (Koester, 1993)

Berdasarkan Gambar 1, ada beberapa kemungkinan kristalisasi dari fasa amorf ke fasa kristal, yaitu:

1. Kristalisasi *Polimorfi*, yaitu pembentukan kristal dari fasa amorf dengan komposisi kimia yang sama dan nilai energi bebas yang minimum. Sebagaimana ditunjukkan garis nomor 1 pada Gambar 1 (amorf $\rightarrow \alpha$ atau amorf $\rightarrow \beta$)
2. Kristalisasi *Primer*, yaitu pembentukan kristal dari fasa amorf menjadi kristal dengan sisa fasa amorf., sebagaimana ditunjukkan garis nomor 2 pada Gambar 1 (amorf $\rightarrow \alpha$ + amorf atau amorf $\rightarrow \beta$ + amorf)
3. Kristalisasi *Eutektik*, yaitu pembentukan kristal dari fasa amorf menjadi kristal dengan komposisi berbeda, sebagaimana ditunjukkan garis nomor 3 pada Gambar 1 (amorf $\rightarrow \alpha$ + β)

Pada Gambar 1 juga berlaku kristalisasi dari fasa kristal 1 ke fasa kristal 2, yang disebut dengan rekristalisasi. Untuk material polimorf akan terjadi transformasi fasa dari bentuk/struktur kristal ke kristal lainnya. Zirkonium merupakan salah satu material logam dengan struktur polimorf.

Berdasarkan penelitian sebelumnya (Triwikantoro dkk., 1999), pemanasan paduan $\text{Zr}_{69,5}\text{Cu}_{12}\text{Ni}_{11}\text{Al}_{7,5}$ pada suhu 360°C (di bawah suhu T_g) fasa yang terbentuk umumnya adalah ZrO_2 (tetragonal) dan kristalisasi yang terjadi adalah kristalisasi primer. Sedangkan pada penelitian lain (Fajarin, 2008), pemanasan paduan $\text{Zr}_{53,1}\text{Cu}_{23}\text{Ni}_{18}\text{Al}_{5,9}$ pada suhu antara T_g dan T_x ($390 - 410^\circ\text{C}$), fasa kristal yang terbentuk adalah ZrO_2 (tetragonal)

dan $\text{Ni}_{10}\text{Zr}_7$. Begitupun juga pemanasan paduan $\text{Zr}_{65}\text{Cu}_{17.5}\text{Ni}_{10}\text{Al}_{7.5}$ dan $\text{Zr}_{69.5}\text{Cu}_{12}\text{Ni}_{11}\text{Al}_{7.5}$ pada suhu antara 390 – 410°C fasa kristal yang terbentuk umumnya adalah ZrO_2 (tetragonal) dan $\text{Zr}_3\text{O}_{1-x}$ (rombohedral). Selain itu terdapat fasa intermetalik pada pemanasan 410°C untuk paduan $\text{Zr}_{69.5}\text{Cu}_{12}\text{Ni}_{11}\text{Al}_{7.5}$.

III. METODE PENELITIAN

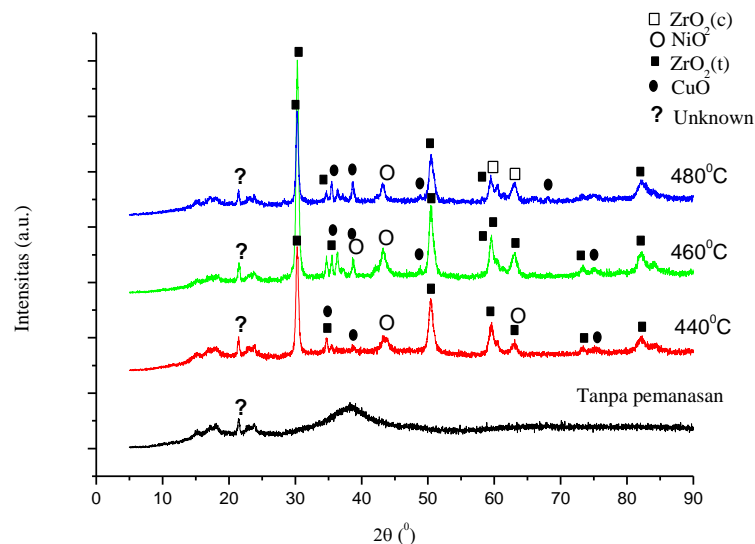
Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah eksperimen. Paduan amorf yang digunakan dalam penelitian ini adalah paduan $\text{Zr}_{53.1}\text{Cu}_{23}\text{Ni}_{18}\text{Al}_{5.9}$, $\text{Zr}_{65}\text{Cu}_{17.5}\text{Ni}_{10}\text{Al}_{7.5}$ dan $\text{Zr}_{69.5}\text{Cu}_{12}\text{Ni}_{11}\text{Al}_{7.5}$. Sampel dipotong dengan ukuran 8 cm, salah satu permukaannya dipoles dengan SiC dan dibersihkan dengan alkohol. Kemudian sampel dipanaskan dengan menggunakan *furnace* tak vakum di atas suhu kristalisasi (T_x) yaitu antara 440-480°C (variasi suhu) selama 1 jam. Setelah dipanaskan, sampel didinginkan di udara terbuka. Untuk mengetahui fasa kristal yang terbentuk sampel diuji dengan menggunakan difraksi sinar-X (*X-Ray Diffraction*). Perhitungan ukuran kristal menggunakan persamaan Scherrer

$$D = \frac{0,9\lambda}{B \cos \theta}, \quad (1)$$

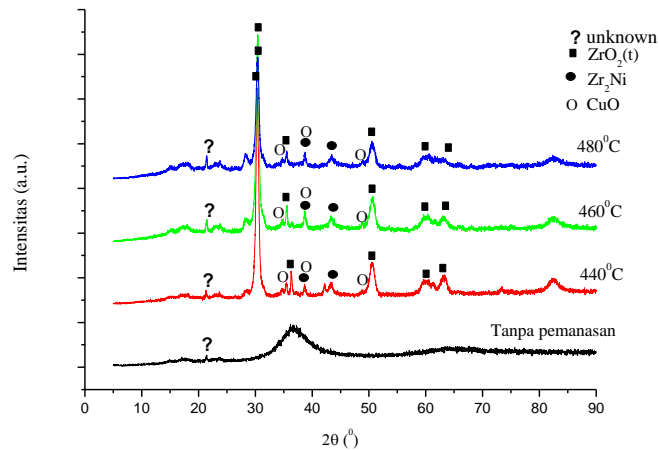
dengan D adalah ukuran kristal, B lebar setengah puncak maksimum, λ adalah panjang gelombang sinar-X dan θ adalah sudut Bragg pada puncak difraksi.

IV. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Pengujian XRD dilakukan sebelum dan sesudah paduan gelas metalik $\text{Zr}_{53.1}\text{Cu}_{23}\text{Ni}_{18}\text{Al}_{5.9}$, $\text{Zr}_{65}\text{Cu}_{17.5}\text{Ni}_{10}\text{Al}_{7.5}$ dan $\text{Zr}_{69.5}\text{Cu}_{12}\text{Ni}_{11}\text{Al}_{7.5}$ dipanaskan di atas suhu kristalisasi (T_x) selama 1 jam dengan variasi suhu 440 C, 460 C dan 480°C. Pemanasan paduan di atas T_x bertujuan supaya terjadi kristalisasi penuh. Gambar 2 menunjukkan pola difraksi sinar-X paduan $\text{Zr}_{53.1}\text{Cu}_{23}\text{Ni}_{18}\text{Al}_{5.9}$, sebelum dan sesudah pemanasan selama 1 jam dengan variasi suhu. Pola difraksi sesudah pemanasan fasa kristal yang terbentuk adalah ZrO_2 , NiO dan CuO dan diantara ketiga fasa yang dominan terbentuk adalah ZrO_2 . Untuk pemanasan 440°C dan 460°C, fasa ZrO_2 mempunyai struktur tetragonal, sedangkan pada pemanasan 480°C fasa ZrO_2 selain berstruktur tetragonal juga terdapat yang berstruktur kubik. Fasa NiO mempunyai struktur rombohedral untuk pemanasan 440°C dan 460°C, dan tidak terbentuk pada pemanasan 480°C. Fasa CuO mempunyai struktur monoklinik dan terbentuk pada semua pemanasan.

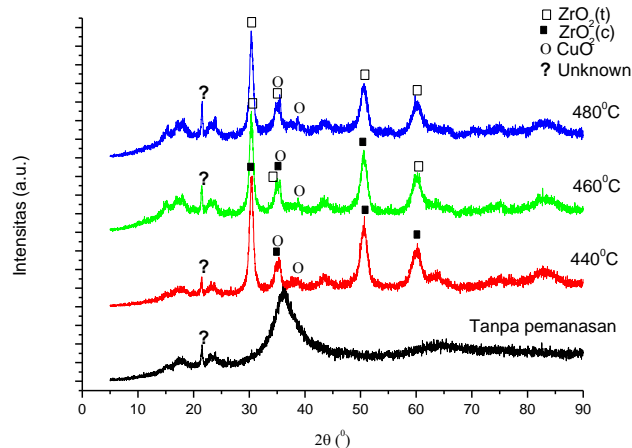


Gambar 2. Pola difraksi sinar-X bahan $\text{Zr}_{53.1}\text{Cu}_{23}\text{Ni}_{18}\text{Al}_{5.9}$ sebelum dan sesudah pemanasan selama 1 jam dengan variasi suhu



Gambar 3. Pola difraksi sinar-X bahan $Zr_{65}Cu_{17.5}Ni_{10}Al_{7.5}$ sebelum dan sesudah pemanasan selama 1 jam dengan variasi suhu

Pola difraksi sinar-X paduan $Zr_{65}Cu_{17.5}Ni_{10}Al_{7.5}$ sebelum dan sesudah pemanasan selama 1 jam dengan variasi suhu ditunjukkan oleh Gambar 3. Terlihat bahwa fasa yang terbentuk setelah pemanasan adalah fasa oksida ZrO_2 dan CuO, dan fasa intermetalik Zr_2Ni . Fasa ZrO_2 mempunyai struktur tetragonal pada pemanasan 440°C. Sedangkan pada pemanasan 460°C dan 480°C, fasa ZrO_2 selain berstruktur kubik, juga terdapat yang berstruktur tetragonal. Untuk fasa oksida yang lain yaitu CuO mempunyai struktur monoklinik pada semua pemanasan. Sedangkan fasa intermetalik Zr_2Ni berstruktur tetragonal. Pola difraksi paduan $Zr_{69.5}Cu_{12}Ni_{11}Al_{7.5}$ sebelum dan sesudah pemanasan selama 1 jam dengan variasi suhu dapat dilihat pada Gambar 4. Fasa-fasa yang terbentuk setelah pemanasan adalah fasa oksida yaitu ZrO_2 dan CuO. Fasa ZrO_2 untuk pemanasan 440°C berstruktur kubik. Namun pada pemanasan 460°C fasa ZrO_2 selain berstruktur kubik juga terdapat yang berstruktur tetragonal. Sedangkan pada pemanasan 480°C fasa ZrO_2 semua berstruktur tetragonal. Fasa oksida lain yang terbentuk yaitu fasa CuO yang berstruktur monoklinik.



Gambar 4. Pola difraksi sinar-X bahan $Zr_{69.5}Cu_{12}Ni_{11}Al_{7.5}$ sebelum dan sesudah pemanasan selama 1 jam dengan variasi suhu

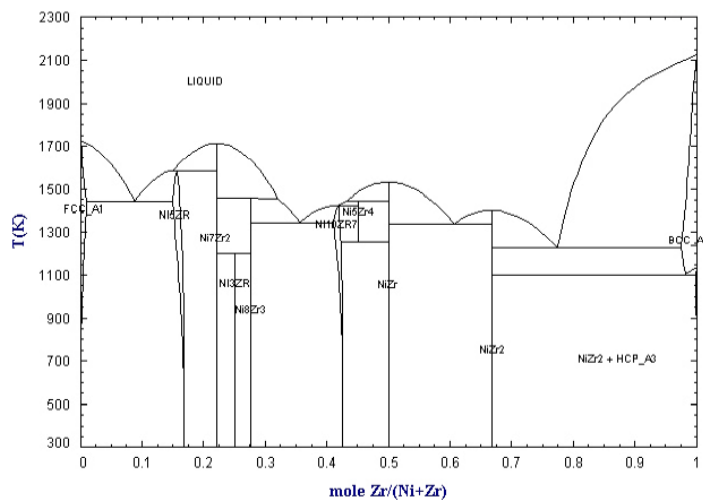
Dari Gambar 2 – 4, terlihat bahwa fasa kristal dominan yang terbentuk untuk masing-masing pemanasan adalah fasa ZrO_2 . Hal ini karena zirkonium mempunyai afinitas kimia yang tinggi dengan oksigen, sehingga zirkonium mudah bereaksi dengan oksigen membentuk oksida. Dan secara serentak oksigen masuk kisi kristal zirkonium dan membentuk oksida pada suhu yang tinggi. Selain itu zirkonium mempunyai prosentase yang paling banyak diantara unsur yang lain. Berdasarkan literatur (Kai, 2002,), Zirkonia (ZrO_2) merupakan fasa yang hanya stabil pada sistem Zr-O, dan terdapat tiga jenis perubahan, yaitu monoklinik- ZrO_2 terbentuk di bawah suhu 1000°-1200°C, tetragonal ZrO_2 stabil pada suhu yang lebih tinggi dan kubik- ZrO_2 yang stabil di atas 1500°C. Namun, transformasi yang tepat berdasarkan suhu juga dipengaruhi oleh impuritas yang terdapat pada paduan.

Dalam penelitian ini, fasa ZrO_2 (tetragonal) dan ZrO_2 (kubik), keduanya teramati. Namun untuk ZrO_2 (monoklinik) tidak teramati. Sebagaimana dari Gambar 2 – 4, pada paduan $Zr_{53.1}Cu_{23}Ni_{18}Al_{5.9}$ fasa ZrO_2

yang terbentuk adalah hanya berstruktur tetragonal untuk masing-masing pemanasan 440°C, 460° dan 480°C. Begitupun juga untuk paduan $Zr_{65}Cu_{17,5}Ni_{10}Al_{7,5}$, fasa ZrO_2 yang terbentuk semuanya berstruktur tetragonal. Sedangkan pada paduan $Zr_{69,5}Cu_{12}Ni_{11}Al_{7,5}$, pada pemanasan 440°C yang teramati fasa ZrO_2 (kubik), pada 460°C teramati fasa keduanya ZrO_2 (kubik) dan ZrO_2 (tetragonal) dan pada 480°C yang teramati semuanya fasa ZrO_2 (tetragonal).

Sedangkan untuk fasa oksida lain yang juga terbentuk selama pemanasan, yaitu CuO dan NiO. Pada paduan $Zr_{53,1}Cu_{23}Ni_{18}Al_{5,9}$ fasa yang teridentifikasi keduanya untuk setiap pemanasan. Sedangkan pada paduan $Zr_{65}Cu_{17,5}Ni_{10}Al_{7,5}$ dan $Zr_{69,5}Cu_{12}Ni_{11}Al_{7,5}$, fasa yang teramati hanya CuO dan NiO tidak terdeteksi. Hal ini terkait dengan prosentase unsur Ni dan Cu yang sedikit pada paduan, sehingga fasa NiO dan CuO merupakan fasa minor. Dalam penelitian ini tidak teridentifikasi oksida Al. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh prosentase unsur Al yang paling sedikit diantara unsur yang lain (Zr, Cu, dan Ni).

Dari ketiga paduan, yang teramati terdapatnya fasa intermetalik setelah pemanasan adalah pada paduan $Zr_{65}Cu_{17,5}Ni_{10}Al_{7,5}$, yaitu fasa Zr_2Ni yang teramati pada masing-masing pemanasan. Fasa Zr_2Ni merupakan fasa intermetalik yang terbentuk pada daerah eutektik, seperti ditunjukkan dalam diagram fasa Zr-Ni pada Gambar 5.



Gambar 5. Diagram fasa Zr-Ni (CRCT, 2008)

Selain itu jika dilihat dari pola difraksi ketiga paduan (Gambar 2 – 4), kristalisasi yang terjadi adalah kristalisasi eutektik, yaitu pembentukan kristal dari fasa amorf menjadi kristal dengan komposisi yang berbeda. Hal ini ditunjukkan dari perbedaan pola difraksi sebelum dan setelah pemanasan, setelah pemanasan intensitas puncak difraksi semakin tinggi dan intensitas background (latar) yang datar, yang mengindikasikan bahwa fasa amorf sudah menjadi kristal. Dan terkait juga dengan suhu pemanasan yang diberikan pada paduan, pada penelitian ini pemanasan dilakukan di atas suhu kristalisasi (T_x), sehingga dalam proses kristalisasi semakin tinggi suhu pemanasan yang diberikan, semakin besar energi termal yang diterima paduan. Energi termal yang diterima digunakan untuk bertransformasi hingga terbentuk struktur akhir yaitu 100% kristal (Fajarin, 2008).

Berdasarkan hasil perhitungan ukuran kristal dengan persamaan (1), ukuran kristal untuk masing-masing pemanasan dapat dilihat pada Tabel I.

Tabel I. Ukuran kristal yang terbentuk pada paduan $Zr_{53,1}Cu_{23}Ni_{18}Al_{5,9}$, $Zr_{65}Cu_{17,5}Ni_{10}Al_{7,5}$ dan $Zr_{69,5}Cu_{12}Ni_{11}Al_{7,5}$

Paduan	Pemanasan	Ukuran (nm)				
		ZrO ₂ (t)	ZrO ₂ (c)	CuO	NiO	Zr ₂ Ni
$Zr_{53,1}Cu_{23}Ni_{18}Al_{5,9}$	440°C	15,9	-	30,6	16,4	-
	460°C	16,52	-	18,63	13,7	-
	480°C	18,5	13,02	26,84	-	-
$Zr_{65}Cu_{17,5}Ni_{10}Al_{7,5}$	440°C	13,2	-	29,22	-	16,32
	460°C	13,4	11,6	26,06	-	16,15
	480°C	12,06	14,05	19,15	-	14,9
$Zr_{69,5}Cu_{12}Ni_{11}Al_{7,5}$	440°C	-	7,84	14,05	-	-
	460°C	17,04	18	24,9	-	-
	480°C	10,17	-	20,74	-	-

Dari tabel I, ukuran kristal untuk fasa ZrO_2 tetragonal berkisar antara 10-17 nm, ZrO_2 kubik antara 7-14 nm, CuO antara 14-30 nm, NiO antara 13-16 nm dan Zr_2Ni antara 14-16 nm. Jika dilihat dari ukuran kristal dengan penambahan suhu ukuran kristal ada yang meningkat dan ada juga yang menurun. Ukuran kristal yang meningkat dengan peningkatan suhu disebabkan oleh semakin besar energi termal yang diterima oleh paduan. Energi termal ini digunakan untuk bertransformasi dari amorf ke kristal. Sedangkan penurunan ukuran kristal dengan peningkatan suhu, kemungkinan karena terjadinya transformasi dari fasa kristal yang satu ke fasa kristal yang lain atau kristal yang sudah terbentuk sebelumnya mengalami *disorder* atau rusak (Fajarin, 2008).

KESIMPULAN DAN SARAN

Pemanasan paduan $Zr_{53.1}Cu_{23}Ni_{18}Al_{5.9}$, $Zr_{65}Cu_{17.5}Ni_{10}Al_{7.5}$ dan $Zr_{69.5}Cu_{12}Ni_{11}Al_{7.5}$ menghasilkan pembentukan oksida yaitu ZrO_2 sebagai fasa dominan dan CuO dan NiO sebagai fasa minor. Selain itu terdapat fasa intermetalik Zr_2Ni pada paduan $Zr_{65}Cu_{17.5}Ni_{10}Al_{7.5}$. Berdasarkan hasil perhitungan dengan persamaan Scherrer, ukuran kristal yang terbentuk untuk fasa ZrO_2 tetragonal berkisar antara 10-17 nm, ZrO_2 kubik antara 7-14 nm, CuO antara 14-30 nm, NiO antara 13-16 nm dan Zr_2Ni antara 14-16 nm.

DAFTAR PUSTAKA

- CRCT, 2008, "Facility for the Analysis of Chemical Thermodynamics", http://www.crct.polymtl.ca/fact/phase_diagram.php?file=Ni-Zr.jpg
- Fajarin, R., 2008, "Analisis Pembentukan Material Nanokristal Dari Material Amorf Berbasis Zirkonium pada Suhu 390°C- 410°C", Tesis, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Koester, U., 1993, "Phase Transformation in Rapidly Solidifying Alloys", *Key Engineering Materials* **81-83**, 227-233.
- Köster, U., Zander, D., Triwikantoro, Rüdiger, A., Jastrow, L., 2001, "Environmental Properties of Zr-Based Metallic Glasses and Nanocrystalline Alloys", *Scripta materialia*, **44**, 1649–1654.
- Köster, U., Jastrow, L., 2007, "Oxidation of Zr-based Metallic Glasses and Nanocrystalline Alloys", *Materials Science and Engineering A*, **449-451**, 57–62.
- Mondal, K., Chatterjee, U.K., Murty, B.S., 2007, "Oxidation Behavior of Multicomponent Zr-based Amorphous Alloys", *Journal of Alloys and Compounds*, vol.433, hal.162–17
- Neogy, S., Mukherjee, A., Ashwini, B., Srivastava, D., Savalia, R.T., Dey, G.K., Venkatraman, N., De, P.K., 2004, "Zirconium Based Bulk Metallic Glass/Tungsten Fibre Composite-Fabrication and Characterization", *International Symposium of Research Student on Materials Science and Engineering*, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Indian Institute of Technology Madras, Chennai, hal. 1-12.
- Saida, J., Li, C., Matsushita, M., Inoue, A., 2000, "Grain Growth Kinetic in Supercooled Liquid Region of $Zr_{65}Cu_{27.5}Al_{7.5}$ and $Zr_{65}Cu_{35}$ Metallic Glasses", *Journal of Materials Science* **35** (16), 4143-4149(7).
- Shin, H.S., Jeong, Y.J., Choi, H.Y., Inoue, A., 2006, "Influence of Crystallization on The Deformation Behavior of $Zr_{55}Al_{10}Ni_5Cu_{30}$ Bulk Metallic Glass in The Supercooled Liquid Region", *Materials Science and Engineering A* **449-451**, 243–247.
- Telford, M., 2004, "The Case for Bulk Metallic Glass", *Materials Today*, hal. 36-43.
- Triwikantoro, Toma, D., Meuris, M., Köster, U., 1999, "Oxidation of Zr-based Metallic Glasses in Air", *Journal of Non-Crystalline Solids*, **252-252**, 719-723.
- Triwikantoro, 2002, "Studi Pengaruh Struktur Mikro pada Sifat Oksidasi dan Kristalisasi Bahan Gelas Metalik Berbasis Zirkonium", *Proceedings Seminar Nasional Lemlit ITS*, Surabaya.
- Zander, D., Köster, U., 2004, "Corrosion of Amorphous and Nanocrystalline Zr-based Alloys", *Materials Science and Engineering A*, **375-377**, 53–59.
- Zhang, W., Jia, F., Zhang, Q., Inoue, A., 2007, "Effects of Additional Ag on the Thermal Stability and Glass-forming Ability of Cu–Zr Binary Glassy Alloys", *Materials Science and Engineering A*, **459**, 330–336.