

Pengaruh Waktu Pemanasan (Anil) terhadap Ketahanan Korosi pada Gelas Metalik Berbasis Zirkonium

Ongki Budi Anggriawan^{1,2}, Moch. Agus Choiron², Jing-Chie Lin¹

¹Department of Mechanical Engineering, National Central University

²Department of Mechanical Engineering, Brawijaya University

E-mail: ongkibudi07@gmail.com

Abstract

The effects of annealing time on the corrosion resistance of a Zr-based bulk metallic glass (BMGs) were studied. The $Zr_{48}Cu_{36}Al_8Ag_8$ BMGs annealed at the temperatures of 471 °C for 0, 23 and 27 min respectively. The partially and fully crystallized was identified by differential thermal analysis (DSC) and by X-ray diffraction (XRD). The corrosion resistances of those BMGs was identified by open circuit potential (OCP), Tafel plot (TP), dan cyclic anodic potentiodynamic polarization (CAPD). The results show that the as-cast of $Zr_{48}Cu_{36}Al_8Ag_8$ BMGs (0 min, full amorphous) has higher corrosion resistance than that of the annealing specimen for 23 and 27 min, while the fully crystallized specimen (27 min) has worst corrosion resistance when compared to the other samples in 0.1 M NaCl solution. The improvement of the corrosion resistance for as-cast (0 min) is better than annealed specimen (23 and 27 min), because the as-cast does not have defects like grain boundary (full amorphous). When the annealing time is longer (27 min), the crystallites grow up (more boundary regions), therefore increasing the susceptibility to the localized corrosion.

Keywords: Metallic glass, Zr-Cu-Al-Ag, corrosion, NaCl

PENDAHULUAN

Gelas metalik atau bulk metallic glass (BMGs) atau material amorf pertama ditemukan pada tahun 1960-an [1, 2]. Lelehan logam harus didinginkan secara cepat dengan kecepatan sekitar 105- 106 K/s untuk menghindari terbentuknya fasa kristal [1, 3]. Gelas metalik pertama kali ditemukan pada tahun 1960-an [1, 2] sebagai kategori baru untuk metal dengan struktur amorf pada fase padat. Pada tahun 1976, Liebermann, H. dan Graham, C. menemukan metode baru untuk membuat pita tipis dari gelas metalik dengan paduan besi, nikel, dan boron dengan alat roda berputar cepat superdingin (supercooled fast spinning wheel) [4].

Akhir-akhir ini gelas metalik banyak sekali diteliti atau dikembangkan karena memiliki sifat yang menarik dan unggul jika dibandingkan dengan paduan logam lainnya, seperti memiliki kekuatan dan kekerasan yang tinggi, batas elastik regangan besar, dan ketahanan korosi yang tinggi [3-6]. Gelas metalik dapat diaplikasikan pada alat olahraga, pegas, implan tubuh dan alat medis [1-6]. Berdasarkan pada banyak penelitian tentang gelas metalik, Inoue, A.

menyimpulkan tiga kriteria penting [7-10] untuk meningkatkan kemungkinan terbentuknya gelas metalik atau struktur amorf, yang meliputi: (1) menggunakan paduan yang terdiri atas tiga atau lebih elemen penyusun, (2) perbedaan ukuran atom elemen penyusun lebih besar dari 12%, dan (3) panas pencampuran antara elemen pembentuk paduan harus negatif ($\Delta G < 0$).

Zirconium dan paduannya sering sekali digunakan dalam industri, seperti industri kimia, bejana reaktor dan pipa vakum [11]. Paduan zirconium pada gelas metalik dipilih karena memiliki kemampuan pembentukan gelas (GFA) yang tinggi, memiliki kekuatan dan kekerasan yang tinggi, batas elastik regangan besar, ketahanan korosi yang tinggi, dan tidak beracun [12-14]. Banyak sekali keunggulan yang diperoleh dengan mencampurkan paduan pada gelas metalik. Penambahan elemen lain, misalnya Ni, Cu, Ag, Al, Si, Cr, Mo, Ti atau Nb pada gelas metalik dapat meningkatkan kekuatan dan kekerasan, serta memiliki ketahanan korosi yang lebih baik [13-17]. Pada tahun 1989, Inoue, A. [18] menemukan bahwa gelas metalik $Zr_{60}Al_{20}Ni_{20}$ memiliki kemampuan

pembentukan gelas (GFA) yang tinggi, memiliki kekuatan dan kekerasan yang tinggi. Sejak saat itu, gelas metalik berbasis paduan zirkonium sangat diminati untuk banyak aplikasi.

Gelas metalik dengan paduan Zr-Cu-Al-Ag sangat sesuai untuk digunakan pada alat medis atau implan pada tubuh manusia karena memiliki banyak sekali keunggulan, diantaranya adalah: memiliki kemampuan pembentukan gelas (GFA) yang tinggi, memiliki kekuatan dan kekerasan yang tinggi, batas elastik regangan besar, anti bakteri sehingga sulit sekali terjadi infeksi untuk implan tubuh, tidak beracun, dan ketahanan terhadap korosi yang tinggi [13-17].

Secara umum korosi didefinisikan sebagai kerusakan suatu bahan material akibat reaksi dengan lingkungan [19]. Konsekuensi serius dari dampak korosi menyebabkan hal ini sangat penting untuk dicegah. Beberapa dampak dari korosi antara lain, yaitu: terkontaminasinya suatu produk, membutuhkan biaya perawatan atau bahkan harus melakukan penggantian, tingkat keamanan yang menurun, serta menurunnya efisiensi.

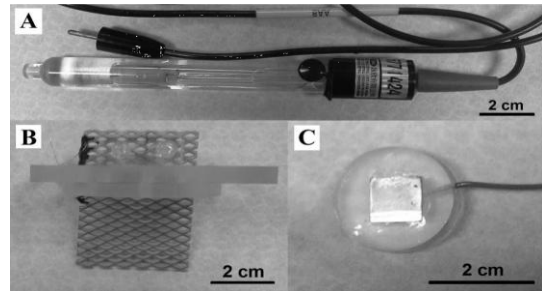
Pengujian korosi secara umum dilakukan dengan teknik elektrokimia, dengan menggunakan metode sel tiga elektroda. Uji ketahanan korosi dapat dilakukan dengan berbagai cara, misal open circuit potential (OCP), Tafel plot (TP), cyclic anodic potentiodynamic polarization (CAPD), dan electrochemical impedance spectroscopy (EIS).

METODE PENELITIAN

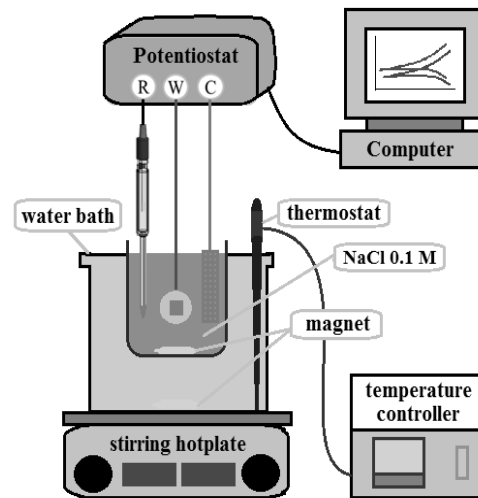
Ingot dari gelas metalik dengan komposisi $Zr_{48}Cu_{36}Al_8Ag_8$ dibentuk dengan pencampuran bahan Zr, Cu, Al, dan Ag murni dengan tungku peleburan (*arc-melting*) dalam kondisi atmosfer argon murni. Ingot dicairkan sebanyak 3 kali untuk mendapatkan pencampuran yang sempurna. Pada proses yang terakhir dilakukan pendinginan cepat (*quenching* dalam air) untuk membentuk gelas metalik berupa pelat dengan ketebalan 2 mm. Pelat tersebut kemudian dipotong dengan mesin EDM (*Electrical Discharge Machining*) dengan ukuran 10 x 10 mm.

Selanjutnya sampel dipanaskan pada temperatur 471 °C dengan waktu anil yang

berbeda, yaitu 0 menit (tanpa anil), 23 menit, dan 27 menit untuk mendapatkan perbedaan persentase dari fasa kristal pada tiap spesimen. Untuk mengetahui persentase fasa kristal pada spesimen dapat dilakukan dengan menggunakan DSC (*differential scanning calorimetric*) dan XRD (*X-ray diffraction*).



Gambar 1. (a) elektroda *reference* (*saturated calomel electrode, SCE (saturated KCl)*), (b) elektroda pembantu (*platinized titanium mesh*), dan (c) elektroda kerja (spesimen).



Gambar 2. Skema diagram dari uji korosi elektrokimia dengan tiga elektrode dalam larutan NaCl 0.1 M pada temperatur 25 °C.

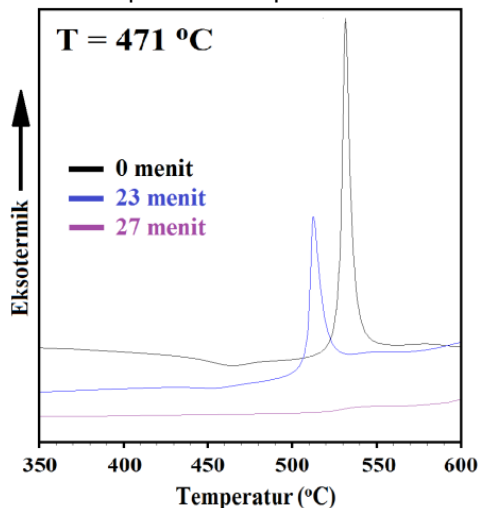
Sebelum uji korosi, spesimen diampas sampai halus dengan ampas grid #400; #600; #1000; dan #2000 hingga permukaan benar-benar bersih dan mengkilap seperti cermin yang kemudian dibersihkan kembali dengan cairan acetone, alkohol dan terakhir dikeringkan dengan gas nitrogen. Sedangkan uji korosi dilakukan menggunakan alat

potensiostat. Pengujian ketahanan korosi dilakukan dengan menggunakan sel elektrokimia (sel tiga elektroda). Ketiga elektrode (Gambar 1) tersebut dimasukkan ke dalam larutan NaCl 0.1 M. Sel korosi kemudian dihubungkan dengan potensiostat dan dilakukan pengolahan data dengan *software powersuit* untuk mengetahui ketahanan korosi dari tiap spesimen, sebagaimana terlihat pada Gambar 2.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Persentase Kristal pada Spesimen

Dari hasil *DSC* yang terlihat pada Gambar 3, menunjukkan gelas metalik $Zr_{48}Cu_{36}Al_8Ag_8$ tanpa anil (0 menit) memiliki puncak eksotermik yang tinggi, ini menjelaskan bahwa spesimen tersebut tidak memiliki fasa kristal (semuanya fasa amorf), sedangkan spesimen dengan anil selama 23 menit memiliki puncak eksotermik yang lebih rendah dari spesimen tanpa dianil.



Gambar3. Grafik *DSC* dari gelas metalik $Zr_{48}Cu_{36}Al_8Ag_8$ dengan variasi waktu anil 0, 23, dan 27 menit pada temperatur 471 °C.

Hal ini menjelaskan bahwa spesimen tersebut memiliki sebagian fasa kristal dan sebagian fasa amorf. Semakin lama waktu anil maka puncak eksotermik yang terbentuk semakin rendah. Pada spesimen dengan waktu anil yang semakin lama, yaitu 27 menit (bertujuan agar terjadi kristalisasi secara penuh) tidak menunjukkan puncak eksotermik, hal ini menjelaskan bahwa

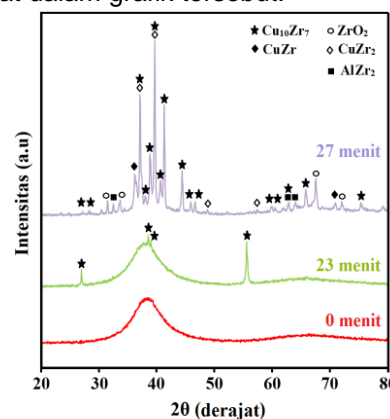
spesimen tersebut terbukti sepenuhnya adalah fasa kristal (kristal 100%).

Persentase kristal pada spesimen dapat dihitung dengan menggunakan *enthalpy* yang hilang (ΔH). ΔH tersebut berasal dari spesimen tanpa dan dengan dianil yang diperoleh dari program analisis saat melakukan tes *DSC*. Hasil ΔH dari spesimen dengan waktu anil 0, 23, dan 27 menit adalah 40.22, 20.26, dan 0 J/g. Dengan rumus (1) di bawah, maka kita dapat menghitung persentase kristal yang secara berurutan sebesar 0, 49.62, dan 100% yang ditunjukkan pada Tabel 1.

$$\% Cryst = \frac{(\Delta H_o - \Delta H_x)}{\Delta H_o} \times 100\% \quad (1)$$

Dimana ΔH_o adalah *enthalpy* yang hilang dari spesimen tanpa dianil (0 menit) dan ΔH_x adalah *enthalpy* yang hilang dari spesimen yang dianil dengan lama waktu yang berbeda.

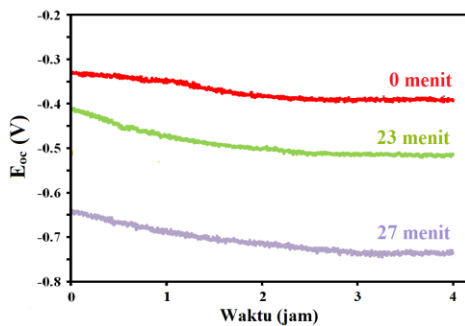
Gambar 4 Menunjukkan grafik *XRD* dari spesimen tanpa dan dengan dianil. Untuk spesimen tanpa dianil (0 menit), grafik tidak menunjukkan puncak kristal sama sekali, hal ini menunjukkan bahwa spesimen tersebut sepenuhnya fasa amorf. Pola difraksi pada spesimen dengan anil selama 23 menit menunjukkan sedikit fasa kristal (hanya fasa kristal $Cu_{10}Zr_7$ yang terbentuk). Sedangkan spesimen dengan anil selama 27 menit tidak hanya fasa kristal $Cu_{10}Zr_7$ yang terbentuk tetapi juga $CuZr$, Zr_2Cu , ZrO_2 , dan $ZrAl_2$ terlihat dalam grafik tersebut.



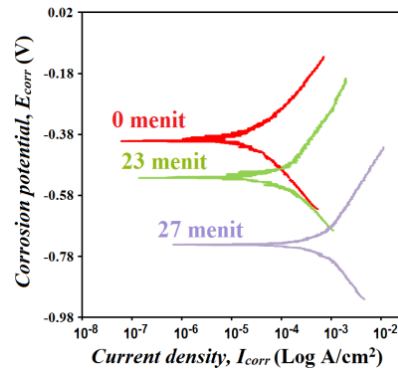
Gambar 4. Pola difraksi sinar-X dari gelas metalik $Zr_{48}Cu_{36}Al_8Ag_8$ dengan variasi waktu anil 0, 23 dan 27 menit di temperatur 471 °C.

Ketahanan Korosi pada Spesimen

Gambar 5 menunjukkan hasil variasi dari *open-circuit potential* (E_{oc}) untuk gelas metalik $Zr_{48}Cu_{36}Al_8Ag_8$ pada larutan NaCl 0.1 M selama 4 jam. Dari gambar 5, kita dapat mengetahui nilai E_{oc} setelah stabil nilainya menurun dari -0.392 V (0 menit, tanpa anil), kemudian -0.514 V (23 menit), dan terakhir -0.736 V (27 menit). Dimana spesimen tanpa perlakuan anil memiliki nilai E_{oc} terbesar, hal ini menunjukkan bahwa spesimen ini memiliki ketahanan korosi yang baik. Di sisi lain, spesimen dengan waktu anil yang lama (27 menit) memiliki nilai E_{oc} yang kecil, hal ini menunjukkan bahwa spesimen ini memiliki ketahanan korosi yang rendah.



Gambar 5. Grafik *open-circuit potential* (E_{oc}) dari gelas metalik $Zr_{48}Cu_{36}Al_8Ag_8$ dengan variasi waktu anil 0, 23, dan 27 menit pada larutan NaCl 0.1 M selama 4 jam.



Gambar 6. Tafel plot (TP) dari gelas metalik $Zr_{48}Cu_{36}Al_8Ag_8$ dengan variasi waktu anil 0, 23, dan 27 menit pada larutan NaCl 0.1 M.

Gambar 7 menunjukkan *cyclic anodic potentiodynamic polarization* (CAPD) dari gelas metalik $Zr_{48}Cu_{36}Al_8Ag_8$ dalam larutan NaCl 0.1 M untuk spesimen tanpa dan dengan proses anil. Potensial korosi (*corrosion potential*, E_{corr}), E_{prot} dan I_{prot} dari hasil *cyclic anodic potentiodynamic polarization* (CAPD) juga tertera pada Tabel 1. Dimana nilai E_{corr} dari *cyclic anodic potentiodynamic polarization* (CAPD) tidak jauh beda dengan hasil *Tafel plot*, dimana nilai E_{corr} menurun dengan semakin lamanya waktu anil, -0.409 V untuk spesimen tanpa anil (0 menit), -0.535 V

Tabel 1. Data propertis dan nilai hasil uji korosi spesimen gelas metalik $Zr_{48}Cu_{36}Al_8Ag_8$ pada larutan NaCl 0.1 M.

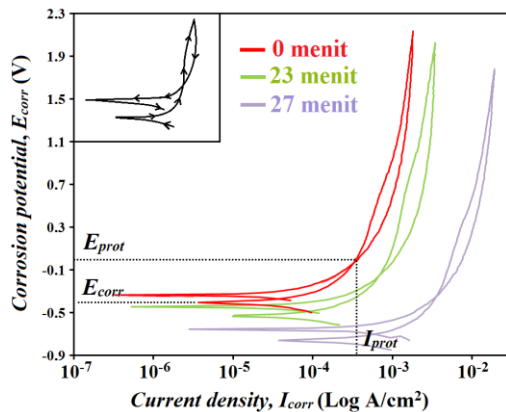
Waktu Anil (menit)	Persentase kristal (%)	OCP			Tafel Plot		CAPD	
		E_{oc} (V)	E_{corr} (V)	I_{corr} (Log A/cm ²)	E_{corr} (V)	E_{prot} (V)	I_{prot} (Log A/cm ²)	
0	0	-0.392	-0.402	-4.31	-0.409	-0.049	-3.510	
23	49.62	-0.514	-0.523	-3.89	-0.535	-0.165	-3.185	
27	100	-0.736	-0.741	-3.04	-0.754	-0.354	-2.468	

Untuk spesimen dengan waktu anil 23 menit, dan -0.754 V untuk spesimen dengan waktu anil 27 menit. Sedangkan nilai E_{prot} juga menurun dengan semakin lamanya waktu anil, -0.049 V untuk spesimen tanpa dianil (0 menit), -0.165 V untuk spesimen dengan waktu anil 23 menit, dan -0.354 V untuk spesimen dengan waktu anil 27 menit. Disisi lain, nilai I_{prot} meningkat dengan semakin

lamanya waktu anil, yaitu -3.510 log A/cm² untuk spesimen tanpa dianil (0 menit), -3.185 log A/cm² untuk spesimen dengan waktu anil 23 menit, dan -2.468 log A/cm² untuk spesimen dengan waktu anil 27 menit.

Hasil dari *open-circuit potential* (E_{oc}), *corrosion potential* (E_{corr}), *current density* (I_{corr}), E_{prot} dan I_{prot} dari *Tafel plots* (TP) and *cyclic anodic potentiodynamic polarization*

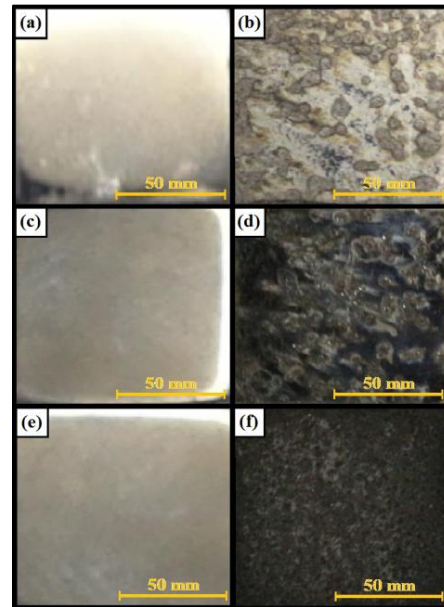
(CAPD) secara berurutan, tercantum pada Tabel 1. Spesimen gelas metalik $Zr_{48}Cu_{36}Ag_8Al_8$ tanpa perlakuan anil (0 menit) emiliki ketahanan korosi yang paling baik pada larutan NaCl 0.1 M bila dibandingkan dengan spesimen lainnya, yang ditunjukkan dengan nilai E_{oc} , E_{corr} (hasil dari TP dan CAPD), dan E_{prot} yang paling tinggi, sedangkan untuk nilai I_{corr} dan I_{prot} dari spesimen ini memiliki nilai terendah. Hal ini disebabkan karena spesimen tanpa perlakuan anil (0 menit) tidak memiliki cacat atau defect seperti batas butir yang merupakan area paling mudah untuk terserang korosi [20]. Oleh sebab itu spesimen gelas metalik $Zr_{48}Cu_{36}Ag_8Al_8$ tanpa perlakuan anil (0 menit) memiliki ketahanan korosi yang terbaik pada larutan NaCl 0.1 M bila dibandingkan dengan spesimen yang di anil selama 23 dan 27 menit.



Gambar 7. cyclic anodic potentiodynamic polarization (CAPD) dari gelas metalik $Zr_{48}Cu_{36}Al_8Ag_8$ dengan variasi waktu anil 0, 23, dan 27 menit pada larutan NaCl 0.1 M.

Spesimen gelas metalik $Zr_{48}Cu_{36}Ag_8Al_8$ yang dianil selama 23 menit memiliki ketahanan korosi yang lebih baik pada larutan NaCl 0.1 M bila dibandingkan dengan spesimen yang dianil selama 27 menit. Hal ini dikarenakan spesimen ini memiliki sebagian fasa kristal dalam fasa amorfnya. Persentase fasa kristal pada spesimen gelas metalik yang dianil selama 23 menit sebesar 49.62% (Tabel 1). Sedangkan spesimen yang dianil dengan durasi 27 menit sepenuhnya merupakan fasa kristal. Sehingga spesimen ini memiliki banyak batas butir apabila di bandingkan dengan spesimen lainnya.

Dimana batas butir merupakan area yang tidak stabil yang memiliki peluang besar (paling mudah) terjadinya korosi lokal (*localized corrosion*) [20]. Hal inilah yang menyebabkan spesimen $Zr_{48}Cu_{36}Ag_8Al_8$ dengan proses anil selama 27 menit memiliki ketahanan korosi paling rendah pada larutan NaCl 0.1 M bila dibandingkan dengan spesimen tanpa dianil dan dianil selama 23 menit.



Gambar 8. Foto kamera (a) sebelum dan (b) sesudah untuk spesimen tanpa perlakuan anil; (c) sebelum dan (d) sesudah untuk spesimen yang dianil selama 23 menit; (e) sebelum dan (f) sesudah untuk spesimen yang dianil selama 27 menit dilakukan perendaman pada larutan NaCl 0.1 M selama 7 hari.

Gambar 8 (a, c, e) menunjukkan foto kamera yang diambil sebelum dan (b, d, f) sesudah perendaman dalam larutan NaCl 0.1 M selama 7 hari. Dari Gambar 8 (a, c, e) terlihat bahwa spesimen tanpa dan dengan proses anil sebelum dilakukan perendaman dalam larutan NaCl 0.1 M semuanya memiliki permukaan yang bersih dan bersinar. Disisi lain, Gambar 8 (b, d, f) menunjukkan spesimen gelas metalik $Zr_{48}Cu_{36}Ag_8Al_8$ tanpa dan dengan proses anil setelah direndam dalam larutan NaCl 0.1 M selama 7 hari memiliki perbedaan yang cukup signifikan.

Spesimen tanpa perlakuan anil (Gambar 8 (a)) memiliki permukaan mengkilap yang masih cukup banyak bila dibandingkan dengan spesimen yang lain setelah direndam dalam larutan NaCl 0.1 M selama 7 hari. Hal ini menunjukkan Spesimen tanpa perlakuan anil (0 menit) memiliki ketahanan korosi yang tinggi. Sedangkan spesimen $Zr_{48}Cu_{36}Ag_8Al_8$ dengan perlakuan anil selama 27 menit memiliki permukaan yang tampak sangat gelap, banyak terdapat lubang, dan tidak halus (Gambar 8 (f)), hal ini mengindikasikan bahwa dengan meningkatnya waktu dari proses anil dapat menurunkan ketahanan korosi pada larutan NaCl 0.1 M karena terbentuknya fasa kristal. Spesimen $Zr_{48}Cu_{36}Ag_8Al_8$ dengan perlakuan anil selama 27 menit memiliki ketahanan korosi yang sangat rendah pada larutan NaCl 0.1 M bila dibandingkan dengan spesimen tanpa perlakuan anil dan spesimen dengan perlakuan anil 23 menit.

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian dapat ditarik beberapa kesimpulan yaitu :

1. Pembentukan gelas metalik (fasa amorf) $Zr_{48}Cu_{36}Ag_8Al_8$ telah berhasil dilakukan dengan tungku peleburan (*arc-melting*) dalam kondisi atmosfer argon murni.
2. Pembentukan fasa kristal pada gelas metalik $Zr_{48}Cu_{36}Ag_8Al_8$ melalui proses anil dengan variasi waktu yang berbeda, yaitu 0, 23, 27 menit menghasilkan persentase kristal sebesar 0, 50, dan 100% fasa kristal.
3. Spesimen gelas metalik $Zr_{48}Cu_{36}Ag_8Al_8$ tanpa perlakuan anil (0 menit) memiliki ketahanan korosi yang paling baik jika dibandingkan dengan spesimen dengan perlakuan anil (23 dan 27 menit). Sedangkan spesimen dengan perlakuan anil selama 27 menit memiliki ketahanan korosi paling buruk pada larutan NaCl 0.1 M jika dibandingkan dengan yang lain.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kalay, I., 2010, "Devitrification kinetics and phase selection mechanisms in Cu-Zr metallic glasses", *Materials Science and Engineering*, Vol.95, 226-233.
- [2] Babilas, R. & Nowosielski, R., 2010, "Iron - based bulk amorphous alloys", *Archives of Materials Science and Engineering*, Vol. 44, 5-27.
- [3] Inoue, A., Makino, A. & Mizushima, T., 2000, "Ferromagnetic bulk glassy alloys", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 215-216, 246-252.
- [4] Libermann, H. & Graham, C., 1976, "Production Of Amorphous Alloy Ribbons And Effects Of Apparatus Parameters On Ribbon Dimensions". *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.12, 921-923.
- [5] Basu, W. & Ranganathan, S., 2003, "Bulk metallic glasses: A new class of engineering materials", *Sadhana*, Vol. 28, 783-798.
- [6] Anantharaman, T. R., 1984, "*Metallic glasses: Production, properties and applications*", Trans. Tech. Publications.
- [7] Takeuchi, A. & Inoue, A., 2005, "Classification of bulk metallic glasses by atomic size difference, heat of mixing and period of constituent elements and its application to characterization of the main alloying element", *Materials Transactions*, Vol. 46, No. 12, 2817-2829.
- [8] Inoue, A., 1995, "High strength bulk amorphous alloys with low critical cooling rates", *Materials Transactions JIM*, Vol. 36, 866-875.
- [9] Inoue, A., 2001, "Bulk amorphous and nanocrystalline alloys with high functional properties", *Materials Science and Engineering*, Vol. A 304-306, 1-10.
- [10] Inoue, A., Shen, B. L. C., & Chang, T., 2006, "Fe- and Co-based bulk glassy alloys with ultrahigh strength of over 4000 MPa", *Intermetallics*, Vol. 14, 936-944.
- [11] Schroeder, V., Gilbert, C. J., & Ritchie, R. O., 1998, "Comparison of the corrosion behavior of a bulk amorphous metal, $Zr_{41.2}Ti_{13.8}Cu_{12.5}Ni_{10}Be_{22.5}$, with its crystallized form", *Materials Science and Mineral Engineering*, Vol. 38, 1481-1485.
- [12] Nie, X. P., Xu, X. M., Jiang, Q. K., Chen, L. Y., Xu, Y., Fang, Y. Z., Xie, G. Q., Luo, M. F., Wu, F. M., Wang, X. D., Cao, Q. P., & Jiang, J. Z., 2009, "Effect of microalloying of Nb on corrosion resistance and thermal stability of ZrCu-based bulk metallic glasses", *Journal of*

- Non-Crystalline Solids*, Vol. 355, 203–207.
- [13] Hua, N., Pang, S. Y., Wang, Li, J., Li, R., Georganakis, K., Yavari, A. R., Vaughan, G., & Zhang, T., 2011, "Ni- and Cu-free Zr–Al–Co–Ag bulk metallic glasses with superior glass-forming ability", *Journal of Materials Research*, Vol.26, 539-546.
- [14] Inoue, A., Zhang, T., Masumoto, T., 1990, "Zr-Al-Ni amorphous alloy with high glass transition temperature and significant supercooled liquid region", *Mater. Trans. Japan Institute metalurgi*, Vol. 31, 177-183.
- [15] Zander, D., & Köster, U., 2004, "Corrosion of amorphous and nanocrystalline Zr-based alloys", *Materials Science and Engineering*, Vol. A 375–377, 53–59.
- [16] Tan, C. G., Jiang, W. J., Wu, X. Q., Wang, X. F., & Lin, J. G., 2007, "Effect of crystallization on corrosion resistance of $\text{Cu}_{52.5}\text{Ti}_{30}\text{Zr}_{11.5}\text{Ni}_6$ bulk amorphous alloy", *Material and Photoelectronic Physics*, Vol. 17, 751-754.
- [17] Paillier, J., Mickel, C., Gostin, P. F., & Gebert, A., 2010, "Characterization of corrosion phenomena of Zr–Ti–Cu–Al–Ni metallic glass by SEM and TEM", *Materials Characterization*, Vol. 61, 1000-1008.
- [18] Inoue, A., Zhang, T., Masumoto, T., 1989, "Zr-Al-Ni amorphous alloys with high glass transition temperature and significant supercooled liquid region", *Mater. Trans.*, Vol. 30, 965-972.
- [19] Dittmer, M., Ritzberger, C., Schweiger, M., Rheinberger, V., Wörle, M., & Höland, W., 2014, "Phase and microstructure formation and their influence on the strength of two types of glass-ceramics", *Journal of Non-Crystalline Solids*, Vol. 384, 55–60.
- [20] Tam, M. K. & Shek, C. H., 2006, "Crystallization and corrosion resistance of $\text{Cu}_{50}\text{Zr}_{45}\text{Al}_5$ bulk amorphous alloy", *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 100, 34–37.