

SIFAT MEKANIS DAN Pengerasan PRESIPITASI PADUAN Al-Zn-Mg DENGAN VARIASI KANDUNGAN Cu SELAMA AGEING PADA TEMPERATUR 120 °C

Abdan Syakuura¹⁾, Bondan T. Sofyan¹⁾, Simon P. Ringer²⁾

¹⁾Departemen Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik Universitas Indonesia

²⁾Australian Centre for Microscopy and Microanalysis (ACMM), the University of Sydney, Australia

E-mail : bondan@eng.ui.ac.id

Masuk tanggal : 04-10-2011, revisi tanggal : 09-07-2012, diterima untuk diterbitkan tanggal : 20-07-2012

Intisari

SIFAT MEKANIS DAN Pengerasan PRESIPITASI PADUAN Al-Zn-Mg DENGAN VARIASI KANDUNGAN Cu SELAMA AGEING PADA TEMPERATUR 120 °C. Paduan aluminium-seng-magnesium-tembaga memiliki aplikasi penting dalam industri penerbangan. Pengaruh Cu terhadap sifat mekanis dan presipitasi dilakukan melalui investigasi sistematis terhadap paduan Al-Zn-Mg-Cu dengan 20 variasi komposisi (kisaran konsentrasi Cu 0,4-1,6 at. % dan Zn (= konsentrasi Mg 1,7-3,0 at. %) selama *ageing* pada temperatur 120 °C. Unit dapur induksi vakum VTC 200 digunakan untuk mempersiapkan semua paduan. Mikrostruktur hasil pengecoran diamati dengan mikroskop optik. Pengukuran kekerasan dilakukan pada sampel dengan beberapa variasi waktu *ageing* untuk mendapatkan kurva *age hardening* dan mengungkap pengaruh Cu dalam paduan Al-Zn-Mg. Karakterisasi dengan SEM dan EDS dilakukan untuk mengungkap evolusi mikrostruktur presipitat. Perbandingan kurva kekerasan menunjukkan bahwa penambahan Cu memberikan efek peningkatan kekerasan cukup signifikan hingga komposisi Zn dan Mg mencapai 2,5 at. %. Pada kadar Zn dan Mg yang tinggi (2,9 at. %) pengaruh Cu tidak lagi signifikan di dalam paduan. Fasa berwarna putih yaitu CuMgAl₂, atau CuAl₂, atau Al₇Cu₂Fe (bila mengandung Fe). Fasa ini semakin meningkat dengan penambahan kadar Cu dalam paduan.

Kata kunci : Paduan Al-Zn-Mg-Cu, Pengecoran induksi vakum, Pengerolan panas, Age hardening

Abstract

MECHANICAL PROPERTIES AND PRECIPITATION HARDENING OF Al-Zn-Mg ALLOYS WITH VARIATION IN Cu CONTENT DURING AGEING AT 120 °C. Aluminium-zinc-magnesium-copper alloys have an important role in aerospace industry. A systematic investigation has been done to explore microstructural evolution in Al-Zn-Mg-Cu alloys with the variation in composition (range of concentration of Zn (= Mg concentration) is 1.7-3.0 at. % and Cu in the range of 0.4-1.6 at. %) during ageing at temperature of 120 °C. An induction vacuum casting unit VTC200 was employed to prepare all Al alloys. Casting microstructures was evaluated by using optical microscopy. Hardness test was performed on the aged samples to obtain the hardness curve and to reveal the influence of Cu addition on Al-Zn-Mg alloys. SEM and EDS characterization was performed to understand the precipitation microstructure evolution. Copper addition gives a significant effect on the increasing of the hardness up to 2.5 at. % of Mg and Zn (Fig. 1). In high levels of Zn and Mg content (2.9 at. %), Cu effect was no longer significant in the alloys. The white phase precipitate indicated the presence of CuMgAl₂, or CuAl₂, or Al₇Cu₂Fe if it contains Fe (Fig 2). These phases tend to increase with the Cu addition in the alloys.

Keywords : Al-Zn-Mg-Cu alloys, Induction vacuum casting, Hot rolling, Age hardening

PENDAHULUAN

Pada industri penerbangan, paduan aluminium seri 7000 dengan kandungan

Cu ini banyak digunakan khususnya pada struktur sayap. Selama 60 tahun terakhir, banyak penelitian-penelitian besar yang difokuskan pada sistem paduan ini.

Pengembangan paduan dilakukan dengan meningkatkan kandungan terlarut dan variasi rasio antara tiga elemen utama (Zn, Mg dan Cu), untuk mencapai kekuatan dengan level tertinggi^[1].

Tembaga (Cu) ditambahkan dalam paduan Al-Zn-Mg untuk meningkatkan kekuatan, mengurangi *hot shortness*, meningkatkan *castability*, dan sebagai *corrosion resistance*. Hadjadj & Amira^[2] melalui pengamatan mikroskop optik menunjukkan bahwa tembaga (Cu) dan magnesium (Mg) berkolaborasi memberikan efek pengurangan dimensi butir yang berkorespondensi terhadap perbaikan sifat mekanis, dimana terjadi peningkatan kekerasan mikro paduan Al-Zn-Mg-Cu.

Penambahan Cu ke paduan seri 7000 juga berguna untuk meningkatkan ketahanan terhadap *stress corrosion cracking* (SCC)^[3]. Penelitian lain menyebutkan bahwa dengan penambahan 0,5 at. % Cu dapat memberikan pengaruh yang besar pada proses presipitasi dan *age hardening* pada paduan Al-Zn-Mg^[4]. Tembaga juga memberikan pengaruh yang besar dalam pelarutan Al-Zn-Mg dan evolusi struktur eutektik, fasa-fasa kasar larut perlahan-lahan di dalam paduan dengan kandungan Cu yang lebih tinggi, kemudian fasa Al₂CuMg terbentuk selama perlakuan panas^[5].

Pengaruh elemen terhadap pengerasan paduan dapat diungkap setelah dilakukan pengerolan dan serangkaian proses perlakuan panas. Pada penelitian ini komposisi paduan ditentukan dalam kisaran persen atom yang cukup besar (kisaran konsentrasi Cu 0,4-1,6 at. % dan Mg (= konsentrasi Zn) 1,7-3,0 at. %). Dari kisaran ini, juga dapat dihasilkan beberapa kombinasi paduan Al-Zn-Mg-Cu dengan komposisi seperti aluminium seri 7xxx yang komersial di pasaran seperti aluminium 7029, 7040 dan 7050.

Diagram fasa *quaternary* kesetimbangan isothermal pada 460 °C untuk paduan Al-Zn-Mg-Cu (Zn = 4 % berat) oleh Liddicoat, P. V^[6] menunjukkan bahwa

penambahan Cu dapat menurunkan kelarutan Mg dalam α larutan padat. Selain itu, pada diagram dapat dilihat kehadiran fasa baru yaitu S dan θ yang merupakan karakteristik fasa yang hadir pada diagram fasa terner Al-Cu-Mg dan diagram fasa biner Al-Cu. Fasa-fasa setimbang yang hadir pada variasi komposisi Zn dan Cu adalah θ (CuAl₂), S (CuMgAl₂), T (Mg₃Zn₃Al₂) dan η (MgZn₂). Analisis perbandingan dari diagram fasa tersebut memberikan gambaran kesimpulan bahwa kehadiran dari Cu dan peningkatan komposisinya dapat menaikkan fasa S, peningkatan Mg menaikkan fasa T dan peningkatan Zn menaikkan fasa η ^[6]. Penelitian ini mempelajari pengaruh kandungan Cu terhadap pengerasan presipitasi paduan Al-Zn-Mg-Cu selama *ageing* pada temperatur 120 °C.

PROSEDUR PERCOBAAN

Kisaran komposisi unsur penyusun paduan Al-Zn-Mg-Cu dalam penelitian ini adalah Zn (=Mg) dibuat dalam rentang 1,7-3,0 at. % dan Cu 0,4-1,6 at. %. Berdasarkan kisaran tersebut, unsur Zn (=Mg) dibagi ke dalam 4 komposisi yaitu 1,7; 2,1; 2,5 dan 2,9 at. % yang masing-masing dikombinasikan dengan variasi 5 komposisi Cu (0,4; 0,7; 1; 1,3 dan 1,6 at. %) menghasilkan 20 paduan Al-Zn-Mg-Cu. Unit dapur induksi vakum VTC200 digunakan untuk mempersiapkan semua paduan. Homogenisasi paduan dilakukan setelah pengecoran pada temperatur 500 °C selama 24 jam. Mikrostruktur hasil pengecoran diamati dengan mikroskop optik untuk memastikan kualitas produk cor (pengecekan porositas gas). Proses pengerolan panas dilakukan terhadap ¼ bagian billet pada rentang temperatur *preheating* 290 °C - 430 °C selama \pm 1 jam hingga mencapai ketebalan \pm 1,5-2 untuk meningkatkan kekerasan dan menghilangkan struktur cor.

Proses perlakuan panas dimulai dengan *solution treatment* pada temperatur 470 °C selama 90 menit, kemudian dicelup dalam

air, lalu dilanjutkan *ageing* pada temperatur 120 °C hingga 7 hari. Pengukuran kekerasan dilakukan pada sampel dengan menggunakan Leco Vicker Hardness Tester LV700AT pada beban 3 kgf dan *dwell time* 10 detik untuk mendapatkan kurva *age hardening* dan mengungkap pengaruh Cu dalam paduan Al-Zn-Mg. Karakterisasi evolusi mikrostruktur presipitat dilakukan dengan menggunakan SEM LEO 420i, dengan persiapan sampel standar tanpa etsa.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Struktur Mikro As Cast

Billet hasil pengecoran paduan Al-1,7Zn-1,7Mg-0,4Cu, Al-1,7Zn-1,7Mg-1,0Cu dan Al-1,7Zn-1,7Mg-1,6Cu (at.%) diamati dengan menggunakan mikroskop optik untuk pengecekan kualitas produk cor seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Pengamatan dilakukan pada dua bagian yaitu bagian atas (dekat area penyusutan) dan bagian dasar billet.

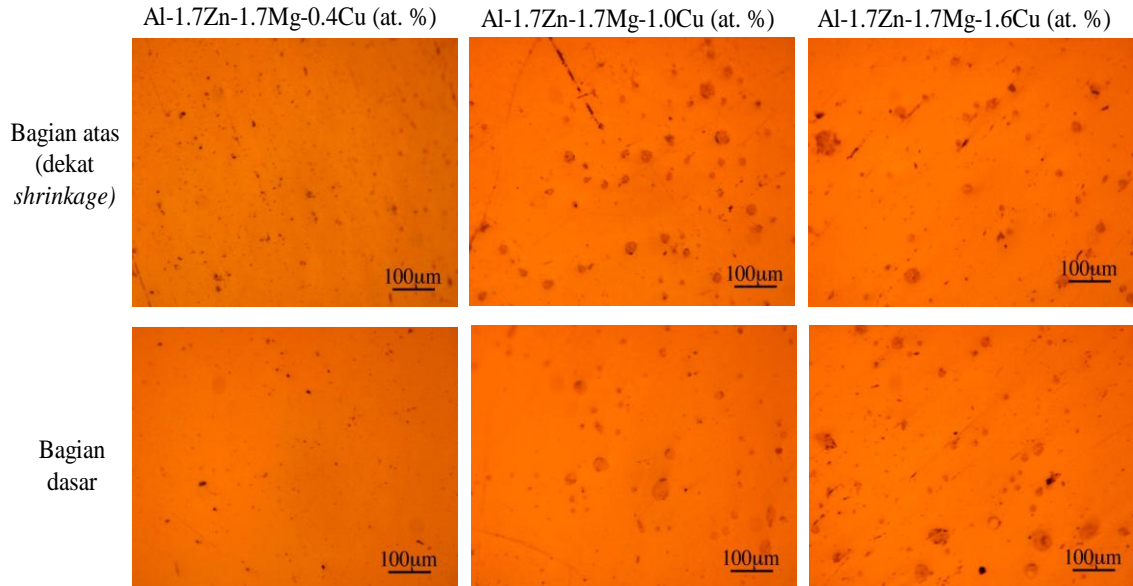
Pengamatan mikroskop optik pada Gambar 1 menunjukkan terdapat beberapa bintik coklat kehitaman. Konsentrasi bintik-bintik coklat kehitaman ini bertambah dengan peningkatan kadar Cu dalam paduan (bintik coklat kehitaman pada 1,6 at. % Cu > 1,0 at. % Cu > 0,4 at. % Cu). Diperkirakan bahwa mereka adalah fasa kedua. Pada pengamatan lebih lanjut dengan SEM ditunjukkan bahwa banyaknya jumlah fasa kedua ini berhubungan dengan peningkatan presipitat yang terbentuk karena elemen Cu.

Pengaruh Cu Terhadap Pengerasan Presipitasi

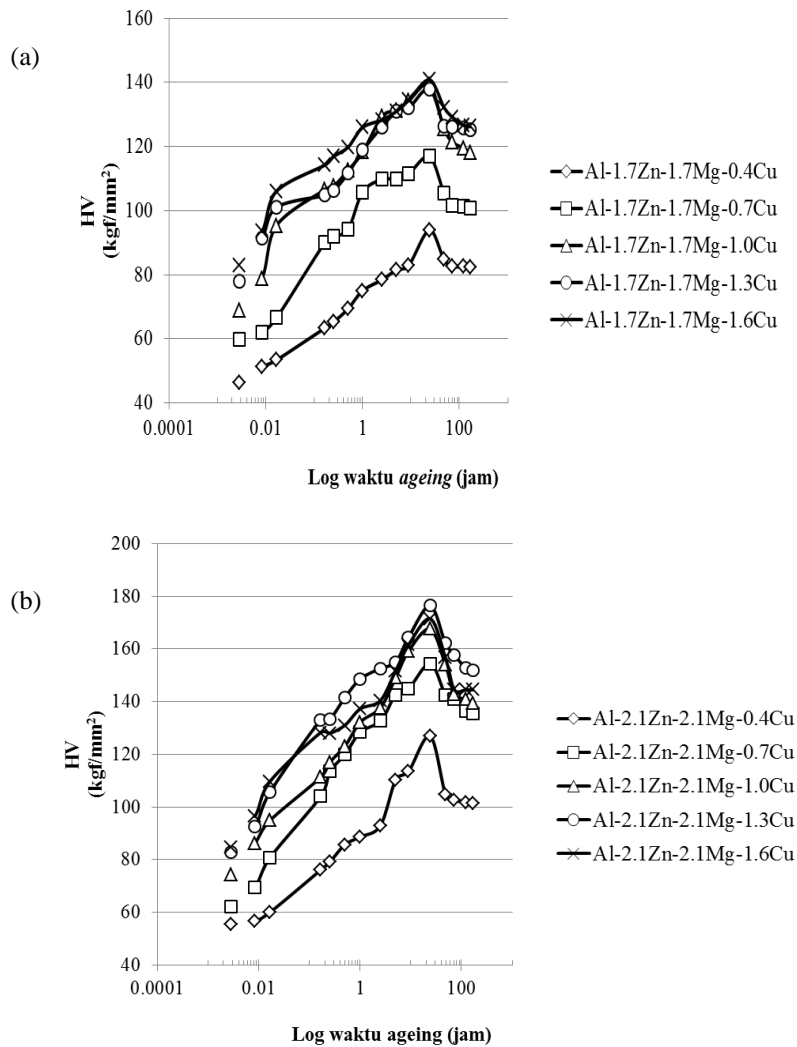
Pengaruh Cu terhadap respon pengerasan presipitasi pada paduan Al-Zn-Mg diamati pada variabel Zn dan Mg yang tetap yaitu 1,7, 2,1, 2,5 dan 2,9 at. % seperti terlihat pada Gambar 2. Nilai kekerasan puncak dari Gambar 2 ini kemudian disajikan lebih lanjut pada Gambar 3.

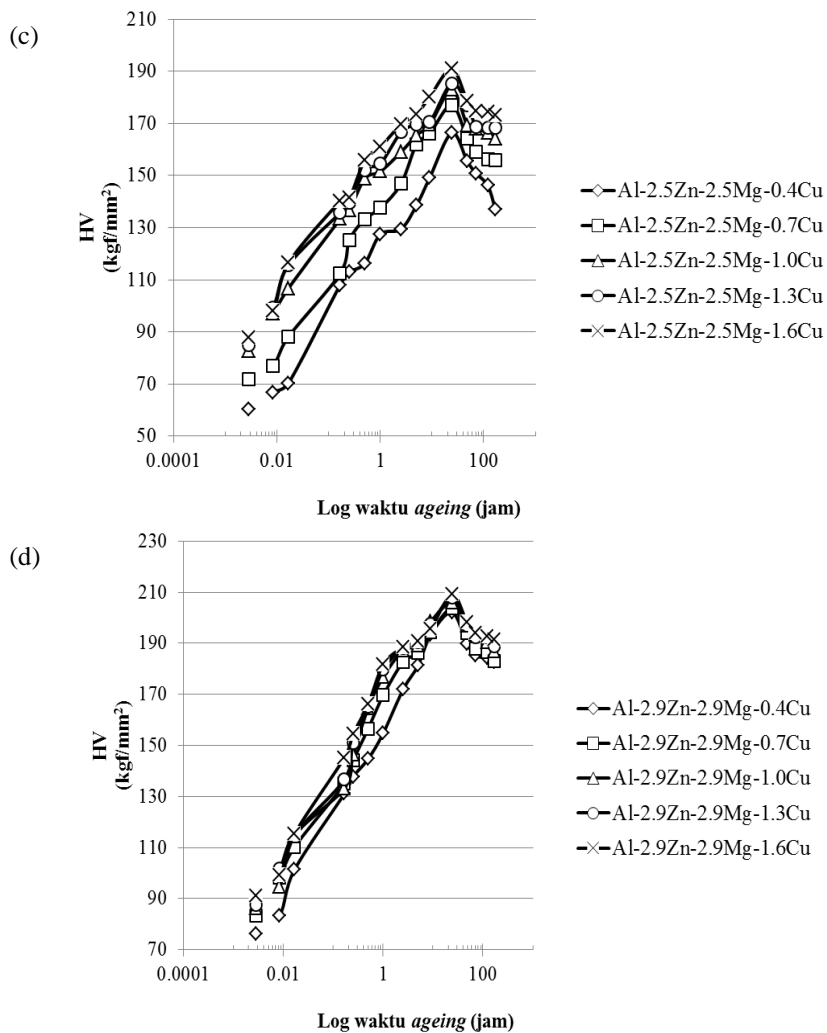
Pengaruh Cu terhadap peningkatan kekerasan paduan Al-Zn-Mg seperti terlihat pada Gambar 2 menunjukkan bahwa peningkatan kadar Cu pada konsentrasi Zn dan Mg yang tinggi (misal konsentrasi Zn (= Mg) adalah 2,9 at. % seperti ditunjukkan pada Gambar 2d) tidak terlalu memberikan efek peningkatan kekerasan yang signifikan bagi paduan Al-Zn-Mg. Gambar 3 menunjukkan bahwa gradien peningkatan kekerasan dengan penambahan Cu pada kadar Zn dan Mg yang tinggi (Al-2,9Zn-2,9Mg-xCu (at.%%)) terlihat lebih landai dibandingkan dengan kondisi yang lainnya. Penambahan Cu tidak diperlukan lagi bagi pengerasan paduan aluminium seri 7xxx dengan kadar Zn dan Mg yang tinggi. Berbeda dengan keadaan ketika Zn (= Mg) berada pada konsentrasi 1,7 at.% dan 2,1 at.% dapat dilihat peningkatan terjadi cukup signifikan setiap penambahan 0,3 at.% Cu.

Namun demikian, penambahan kadar Cu untuk peningkatan kekerasan yang signifikan terbatas sampai komposisi Cu= 1,3 at.%.

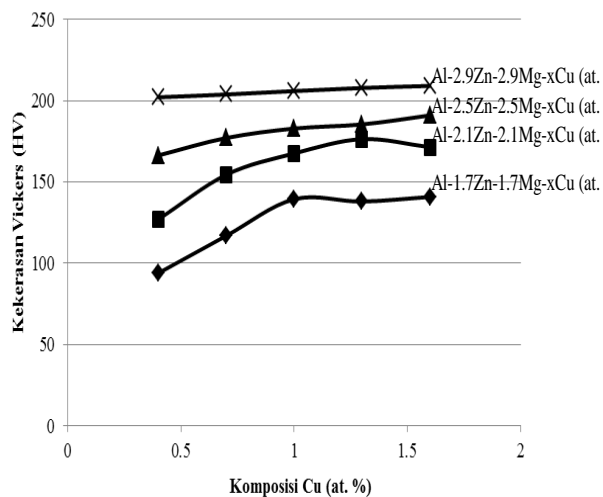


Gambar 1. Struktur mikro *as cast* paduan Al-1,7Zn-1,7Mg-0,4Cu, Al-1,7Zn-1,7Mg-1,0Cu dan Al-1,7Zn-1,7Mg-1,6Cu (at. %) tanpa etsa





Gambar 2. Respon pengerasan pada paduan (a) Al-1,7Zn-1,7Mg-xCu, (b) Al-2,1Zn-2,1Mg-xCu, (c) Al-2,5Zn-2,5Mg-xCu dan (d) Al-2,9Zn-2,9Mg-xCu (at. %) selama *ageing* pada temperatur 120 °C

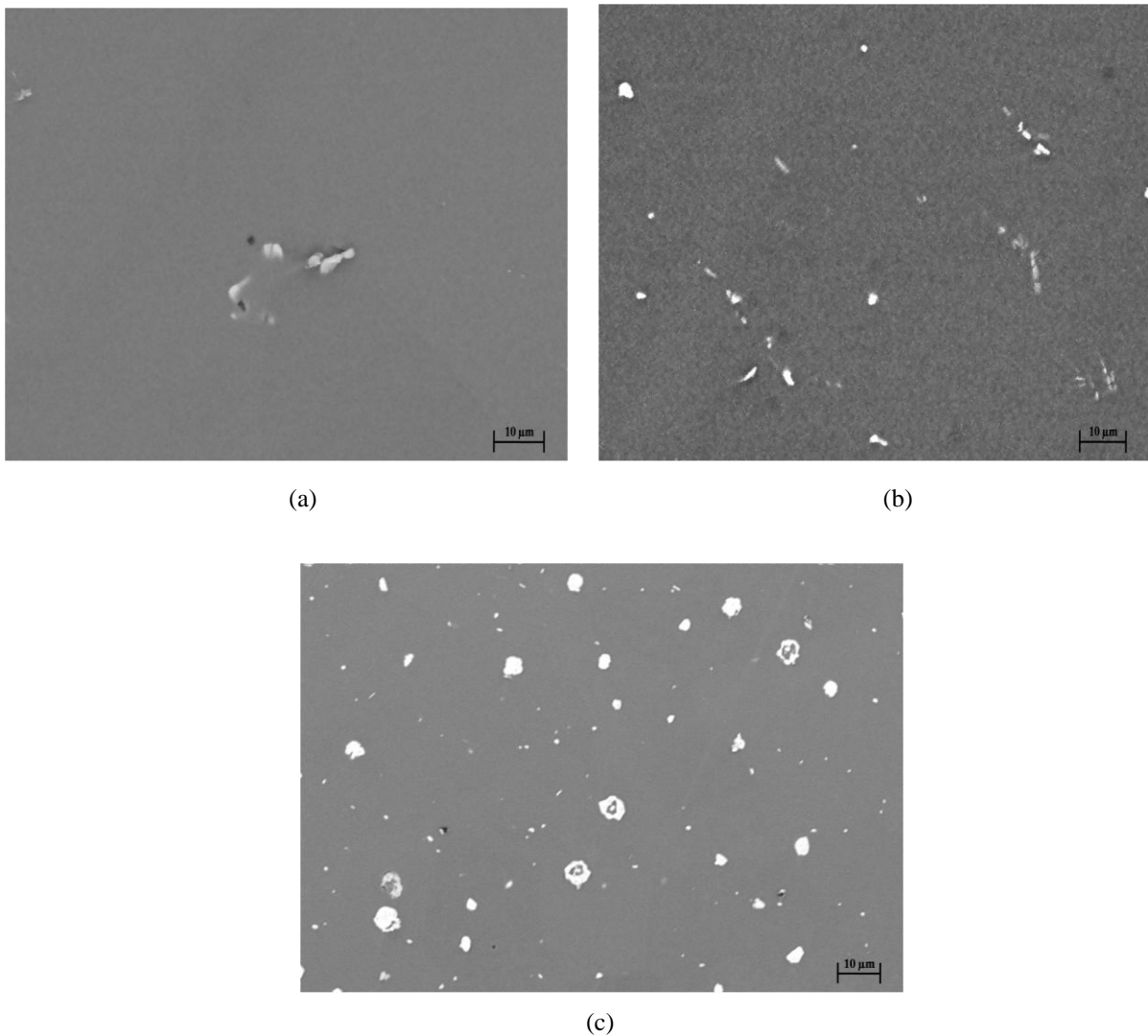


Gambar 3. Pengaruh kandungan Cu pada kekerasan puncak paduan Al-Zn-Mg-Cu selama *ageing* pada temperatur 120 °C

Pada kadar Zn dan Mg yang tinggi (2,9 at. %) pengaruh Cu tidak lagi signifikan di dalam paduan. Hal ini disebabkan fenomena pada paduan Al-Zn-Mg-Cu, dimana Cu dan Al dapat menggantikan Zn pada $MgZn_2$ membentuk $Mg(Zn,Cu,Al)_2$. Pada kadar Zn dan Mg yang rendah, kekosongan (*vacancy*) yang disediakan Cu dapat menyediakan tempat untuk pembentukan presipitat oleh Zn dan Mg. Jumlah kekosongan dengan sendirinya lebih banyak terbentuk pada kadar Zn dan

Mg yang tinggi. Sehingga pengaruh Cu tidak akan memberikan respon yang signifikan lagi seperti mekanisme penguatan pada kadar Zn dan Mg yang rendah. Mondolfo *et al*^[7] juga menyebutkan batas bahwa komposisi Cu untuk paduan Al-Zn-Mg adalah sebesar 0-3 % berat, atau kurang dari 1,3 at. %. Penambahan lebih dari 1,3 at. % tidak diaplikasikan pada paduan komersil Al-Zn-Mg karena batasan efek peningkatan kekuatan material.

Observasi Mikrostruktur Setelah Ageing



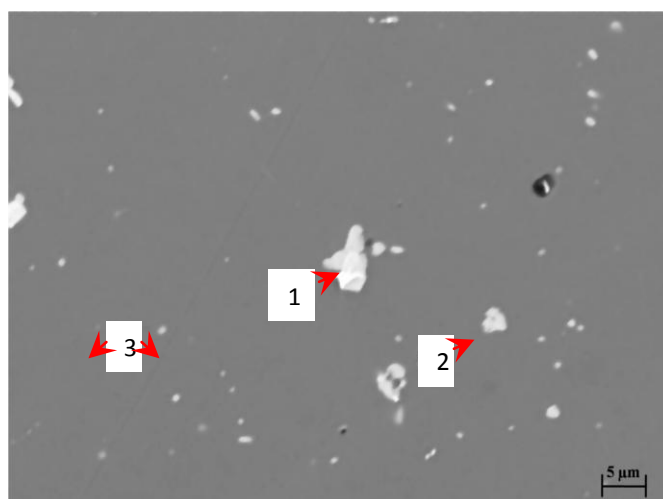
Gambar 4. Foto *back scattered electron* (BSE) paduan (a) Al-1,7Zn-1,7Mg-0,4Cu, (b) Al-1,7Zn-1,7Mg-0,7Cu dan (c) Al-1,7Zn-1,7Mg-1,6Cu (at. %) selama 1 minggu *ageing* pada temperatur 120 °C dengan perbesaran 1000X

Pengamatan mikrostruktur dan presipitat dilakukan pada paduan dengan kadar Zn (= Mg) yang tetap, yaitu Al-1,7Zn-1,7Mg-0,4Cu, Al-1,7Zn-1,7Mg-0,7Cu dan Al-1,7Zn-1,7Mg-1,6Cu (at.%) dengan menggunakan SEM seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Analisis kuantitatif perhitungan fraksi volume fasa dengan menggunakan *square grid* pada ASTM E 562 – 02^[8] (seperti disajikan pada Tabel 2) dilakukan guna mengetahui perbedaan pengaruh Cu terhadap pembentukan presipitat pada paduan Al-Zn-Mg-Cu.

Analisis kuantitatif fasa dengan metode planimetri seperti ditunjukkan pada Tabel 2 digunakan untuk mengobservasi pengaruh peningkatan kadar Cu dalam

paduan Al-Zn-Mg (lihat Gambar 4). Hasil analisis ini menunjukkan bahwa terjadi kenaikan fraksi volume fasa dengan peningkatan kadar Cu dalam paduan. Peningkatan fraksi volume fasa terjadi sebesar 4,69 % pada penambahan 0,3 at. % Cu. Selanjutnya dengan penambahan sebesar 1,2 at. % Cu, fraksi volume fasa meningkat cukup signifikan yaitu sebesar 15,63 %.

Pengamatan dengan menggunakan EDS (Gambar 5 dan Tabel 2) pada paduan Al-1,7Zn-1,7Mg-1,6Cu (at. %) menunjukkan bahwa fasa berwarna putih terang merupakan fasa Al₇Cu₂Fe sedangkan fasa putih keabu-abuan adalah fasa CuMgAl₂ atau CuAl₂.



Gambar 5. Foto *back scattered electron* (BSE) paduan Al-1,7Zn-1,7Mg-1,6Cu (at. %) selama 1 minggu *ageing* pada temperatur 120 °C dengan perbesaran 2000X

Tabel 1. Perhitungan fraksi volume fasa paduan Al-1,7Zn-1,7Mg-0,4Cu, Al-1,7Zn-1,7Mg-0,7Cu dan Al-1,7Zn-1,7Mg-1,6Cu (at. %) selama 1 minggu *ageing* pada temperatur 120 °C

Paduan (at. %)	Al-1,7Zn-1,7Mg-0,4Cu	Al-1,7Zn-1,7Mg-0,7Cu	Al-1,7Zn-1,7Mg-1,6Cu
	Jumlah titik pada <i>grid</i> : 64 Titik menumbuk fasa = 3 buah Titik menyinggung fasa = 2 buah Jumlah titik = $3 + 2/2 = 4$ buah Fraksi volume = $(4/64) \times 100\% = 6,25\%$	Jumlah titik pada <i>grid</i> : 64 Titik menumbuk fasa = 5 buah Titik menyinggung fasa = 4 buah Jumlah titik = $5 + 4/2 = 7$ buah Fraksi volume = $(7/64) \times 100\% = 10,94\%$	Jumlah titik pada <i>grid</i> : 64 Titik menumbuk fasa = 10 buah Titik menyinggung fasa = 8 buah Jumlah titik = $10 + 8/2 = 14$ buah Fraksi volume = $(14/64) \times 100\% = 21,88\%$

Tabel 2. Rangkuman hasil EDS paduan Al-1,7Zn-1,7Mg-1,6Cu (at. %) 1 minggu *ageing* pada temperatur 120 °C berdasarkan foto BSE Gambar 5

No	Rata-rata unsur (at. %)						Fasa yang mungkin
	Zn	Mg	Cu	Fe	Si	Al	
1	--	--	15,07	2,36	--	78,15	Al ₇ Cu ₂ Fe
2	--	1,36	2,70	--	--	91,66	CuMgAl ₂ atau CuAl ₂
3	1,16	--	--	--	--	96,24	Al (matriks)

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian terhadap paduan Al-Zn-Mg-Cu yang telah diuraikan, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Pada kadar Zn dan Mg yang tinggi (2,9 at.%) pengaruh Cu tidak lagi signifikan di dalam paduan. Hal ini disebabkan fenomena pada paduan Al-Zn-Mg-Cu, dimana Cu dan Al dapat menggantikan Zn pada MgZn₂ membentuk Mg(Zn,Cu,Al)₂. Pada kadar Zn dan Mg yang rendah, kekosongan (*vacancy*) yang disediakan Cu dapat menyediakan tempat untuk pembentukan presipitat oleh Zn dan Mg. Jumlah kekosongan dengan sendirinya lebih banyak terbentuk pada kadar Zn dan Mg yang tinggi. Sehingga pengaruh Cu tidak akan memberikan respon yang signifikan lagi seperti mekanisme pengerasan pada kadar Zn dan Mg yang rendah.
2. Respons *ageing* pada temperatur 120 °C yang paling tinggi ditunjukkan oleh paduan Al-2,9Zn-2,9Mg-1,6Cu (at.%) dengan nilai kekerasan puncak 209,11 HV atau meningkat sebesar 58,11 % dari kondisi *as quenched*.
3. Presipitat putih yang merupakan fasa intermetalik oleh elemen Cu (diperkirakan adalah CuMgAl₂ atau CuAl₂, jika dengan Fe dapat membentuk Al₇Cu₂Fe), akan semakin meningkat dengan penambahan kadar Cu dalam paduan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Sebagian penelitian ini dibiayai melalui skema Hibah Kompetensi Dikti Batch 1 tahun 2010. Terima kasih pada Dr. Gang Sha dan Dr. Patrick Trimby yang telah membantu pengamatan dan analisis SEM.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Warner, T. 2006. „Recently-developed aluminium solutions for aerospace applications”. : 1271-1278.
- [2] Hadjadj, L. and R. Amira. 2009. „The effect of Cu addition on the precipitation and redissolution in Al-Zn-Mg alloy by the differential dilatometry”. *Journal of Alloys and Compounds*. : 484(1-2), 891-895.
- [3] Sarkar, B., M. Marek, and E. Starke. 1981. „The effect of copper content and heat treatment on the stress corrosion characteristics of Al-6Zn-2Mg-X Cu alloys”. *Metallurgical and Materials Transactions A*. : 12(11), 1939-1943.
- [4] Chinh, N.Q., et al. 2004. „The effect of Cu on mechanical and precipitation properties of Al-Zn-Mg alloys”. *Journal of Alloys and Compounds*. : 378(1-2), 52-60.
- [5] Xi-gang, F., Da-ming, Jiang., Qing-chang, Meng., Bao-you, Zhang., Tao, Wang. 2006. „Evolution of Eutectic Structures in Al-Zn-Mg-Cu Alloys during Heat Treatment”. *Transaction of Nonferrous, Metal Society of China*. : 16, 577-581.
- [6] Liddicoat, P.V. 2009. „Evolution of Nanostructural Architecture in 7000 Series Aluminium Alloys during

Strengthening by Age-Hardening and Severe Plastic Deformation". *Australian Key Centre for Microscopy & Microanalysis Electron Microscopy Unit*. The University of Sydney, Sydney.

[7]Mondolfo, L.F., Aluminium Alloys : Structure and Properties. 1976.Boston: Butterworth & Co Ltd.

[8]ASTM-International, Standard Test Method for Determining Volume Fraction by Systematic Manual Point Count. 2002. ASTM-International: United States.

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

Abdan Syakuura, lahir pada tanggal 28 Mei 1990 di Jakarta, S1 Departemen Teknik Metalurgi dan Material, Fak. Teknik Universitas Indonesia. Pernah bekerja sebagai Asisten Riset Prof. Dr. Ir. Bondan T. Sofyan, M.Si pada tahun 2011. Pernah melakukan kolaborasi riset bersama Prof. Simon P. Ringer di Australian Centre for Microscopy and Microanalysis (ACMM), the University of Sydney, Australia (Oktober 2010-Maret 2011).

