

Pengaruh Penambahan Cu terhadap Respons Pengerasan Penuaan Komposit Al-8Zn-4Mg Berpenguat SiC Hasil *Squeeze Casting*

Maseska Fatma Syarida, Risly Wijanarko, Dwi Rahmalina dan Bondan T. Sofyan^{1, a)}

¹Departemen Teknik Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Depok.

^{a)}bondan@eng.ui.ac.id

Abstract.

The role of Cu in the precipitation strengthening of aluminium composites has been studied. Aluminium with low hardness and strength combined with alloying elements and SiC was expected to possess high strength. Age hardening was also conducted to further improve the composites toughness. Composites of Al-8Zn-4Mg matrix reinforced by 15 % SiC with varied content of 0, 1, and 3 wt. % Cu were fabricated through squeeze casting process. The composites were then solution treated at 500 °C for 1 h and aged at 200 °C for up to 100 h. Final products were characterized by using chemical composition testing, optical microscopy, Scanning Electron Microscope – Energy Dispersive Spectroscopy (SEM-EDS), hardness test, and impact test. Results showing that the addition of Cu increased the peak hardness due to the presence of precipitates. All samples reached peak hardness after aged for 2 h with the value of 83.36, 83.74, and 91.17 HRB with varied content of 0, 1, and 3 % Cu, respectively. However, the impact values decreased with the addition of Cu from 45440.86 to 42561.46 and 38533.40 J/m². Addition of Cu was found to perform grain refinement so that increased the hardness and decreased the impact value. SEM-EDS observation confirmed the presence of MgZn₂ in grain boundaries, CuMgAl₂ which existed in 3 wt. % Cu, and (FeMn)₃Si₂Al₁₅ intermetallic phase.

Keywords: aluminium composite, Cu, SiC, ageing, precipitation

1 PENDAHULUAN

Material komposit banyak digunakan sebagai material pengganti baja karena lebih ringan, namun memiliki sifat mekanis yang tinggi. Salah satu jenis komposit yang biasa digunakan adalah MMC (*Metal Matrix Composit*) dengan penyusun matriks aluminium dengan berpenguat SiC. Paduan aluminium merupakan salah satu material *armour* dengan sifat balistik yang baik dan berat jenis yang ringan. Selain itu, aluminium mudah dipadu dengan unsur lain untuk meningkatkan sifat mekanisnya [1]. Untuk memperoleh paduan aluminium yang dapat ditingkatkan kekuatannya melalui perlakuan panas pengerasan pengendapan, maka diperlukan unsur paduan seperti Zn, Mg, dan Cu sehingga dihasilkan jenis aluminium seri 7xxx (Al-Zn-Mg-Cu). Paduan Al-Zn-Mg-Cu merupakan sistem paduan yang kompleks karena terdapat beberapa fasa intermetalik yang terbentuk selama pembekuan. Penelitian oleh Xiang, *et al.* [5] menunjukkan bahwa pada saat solidifikasi terbentuk mikrostruktur yang meliputi α (Al), eutektik (α (Al) + Mg(Al,Cu,Zn)₂) dan Al₇Cu₂Fe.

Penguatan maksimum pada paduan aluminium yang dipadu dengan Cu, dicapai pada kadar 4 – 6 % berat Cu dan bergantung pada pengaruh unsur lain pula [2]. Hadjadj & Amira [3] menunjukkan bahwa Cu memberikan pengaruh pengurangan dimensi butir yang bisa meningkatkan kekuatan mekanis. Semakin kecil ukuran butir maka semakin banyak batas butir yang terbentuk yang dapat menghambat pergerakan dislokasi [4]. Sementara itu, keberadaan SiC memberikan pengaruh pada ketahanan impak suatu material. Kheder *et al.* [5] dalam penelitiannya membuktikan

bahwa harga impak akan menurun seiring dengan meningkatnya kadar SiC. Selain itu, SiC juga memiliki pengaruh dalam mereduksi ukuran butir sehingga memberikan efek penguatan namun keuletan material menurun.

Proses pengerasan penuaan dapat mempengaruhi kekuatan balistik komposit aluminium. Mondal *et al.* [6] menunjukkan bahwa kekuatan balistik paduan aluminium 7050 pada kekerasan puncak setelah penuaan memiliki kekerasan tertinggi dan ketahanan penetrasi proyektil yang tinggi dibandingkan daerah penuaan awal dan penuaan berlebih. Oleh karena itu, dapat dikatakan bahwa pengerasan penuaan akan meningkatkan ketahanan material terhadap beban kejut. Selain itu, penambahan SiC pada aluminium komposit menambah ketahanan dan ketangguhan material terhadap penetrasi peluru [7]. Pada penelitian sebelumnya [10], karakteristik balistik dengan komposisi komposit Al-5Zn-6Mg dengan 10 % berat SiC menunjukkan ketahanan penetrasi yang baik, namun terjadi retakan dan lendutan deformasi yang besar. Sementara itu, untuk komposit berpenguat 20 % berat SiC mempunyai penetrasi kedalaman yang kecil, namun masih terjadi retak yang panjang dan menjalar hingga ke bagian dalam. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa panel ini masih harus ditingkatkan ketangguhannya. Oleh karena itu, pada penelitian ini akan dilakukan perancangan pelat komposit Al-8Zn-4Mg dengan penguat SiC 15 vol. % dan variabel Cu (0, 1 dan 3 % berat) dengan metode *squeeze casting*, dilanjutkan dengan proses penuaan. Kemudian, karakterisasi material akan dilakukan untuk melihat pengaruh Cu terhadap fenomena pengerasan penuaan, kekerasan, dan ketahanan balistik dari komposit tersebut.

2 METODE PENELITIAN

Komposit aluminium yang dibuat merupakan paduan Al-8Zn-4Mg (% berat) dengan penambahan variasi kadar Cu sebesar 0, 1, dan 4 % berat serta partikel penguat SiC #180 sebanyak 15 % fraksi volume. Proses peleburan ingot Al (99.99 % berat), seng (99.99 % berat), Mg (99.99 % berat), dan Cu (99.99 % berat) dilakukan pada temperatur 850 – 875 °C, diikuti dengan proses *degassing* menggunakan gas argon selama 2 – 3 menit. Kemudian, partikel SiC yang telah dipanaskan terlebih dahulu pada temperatur 1100 °C dicampur ke dalam leburan paduan aluminium dan diaduk dengan kecepatan 5000 rpm. Setelah itu, logam cair dituang ke dalam cetakan logam berukuran 170 mm x 170 mm x 15 mm dan dilakukan proses penekanan sebesar 1 MPa selama 1 menit. Komposisi aktual komposit aluminium pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1. Pengerasan penuaan yang terdiri atas 3 tahap, yaitu laku pelarutan, pendinginan cepat, dan penuaan. Proses laku pelarutan dilakukan pada temperatur 500 °C selama 60 menit. Setelah itu, sampel didinginkan cepat ke dalam air dengan temperatur 20 – 25 °C. Setelah itu, dilakukan proses penuaan buatan pada temperatur 200 °C selama 5 menit hingga 100 jam.

Pengujian kekerasan dilakukan dengan *Rockwell B* menggunakan standar ASTM E-18. Sementara itu, pengujian impak dilakukan mengacu pada ASTM E23 untuk masing-masing sampel. Pengamatan mikrostruktur dilakukan menggunakan SEM – EDS (*Scanning Electron Microscope – Energy Dispersive Spectroscopy*) dan mikroskop optik. Selain itu, pengujian balistik dilakukan menggunakan pengujian tipe III pada pelat berukuran 100 mm x 100 mm x 15 mm. Sebelum ditembak, sampel komposit dilakukan pengerasan penuaan dan pengerasan permukaan dengan *thermal spray coating* menggunakan material *tungsten carbide-cobalt (WC-Co)* dengan metode *high velocity oxygen fuel (HVOF)*. Senjata yang digunakan adalah SPR-1 kaliber 7.62 mm dengan jarak tembak 15 m. Kecepatan peluru menghantam sampel sekitar 850-900 m/s.

TABEL 1. Komposisi kandungan unsur paduan

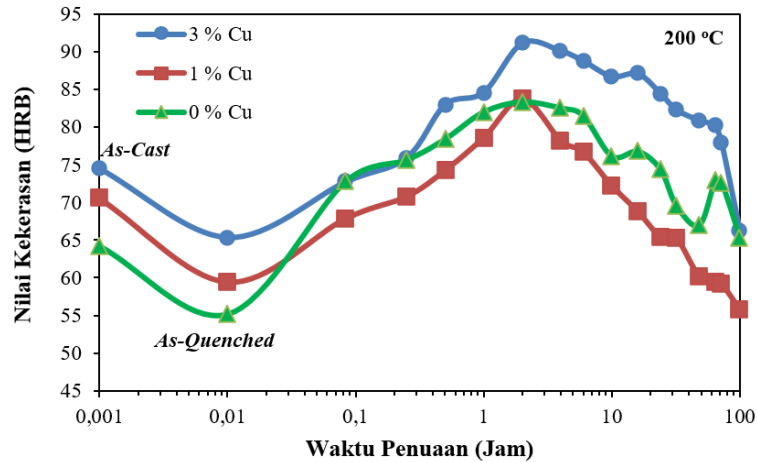
Sampel	Zn	Mg	Cu	Si	Fe	Mn	Ti	Cr	Ni	Al
0 % berat Cu	7.25	3.86	0	12.86	0.16	0.02	0.01	0	0.01	Rem
1 % berat Cu	8.75	3.92	0.91	12.38	0.24	0.04	0.02	0.01	0.02	Rem
3 % berat Cu	8.77	4.05	2.66	12.20	0.17	0.02	0.01	0.01	0.01	Rem

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Kurva Pengerasan Penuaan

Pengaruh Cu terhadap kekerasan paduan Al-8Zn-4Mg berpenguat SiC 15 % fraksi volume dengan variasi kandungan Cu dapat dilihat pada Gambar 1. Nilai kekerasan saat kekerasan puncak yang dicapai dalam waktu 2 jam untuk variasi 0, 1 dan 3 % berat Cu secara berturut-turut adalah 83.36, 83.74 dan 91.17 HRB. Dapat dilihat pada

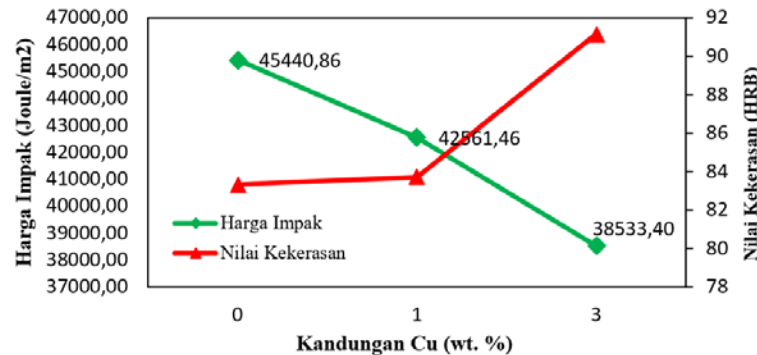
Gambar 1 bahwa bertambahnya kandungan Cu maka nilai kekerasan puncak akan semakin tinggi. Hal ini sesuai dengan penelitian Hadjadj & Amira [3] yang menunjukkan bahwa Cu memberikan pengaruh pada pengurangan dimensi butir sehingga kekuatan mekanis meningkat. Cu juga memberikan pengaruh dalam pelarutan Al-Zn-Mg dan evolusi struktur eutektik sehingga diperkirakan fasa Al_2CuMg terbentuk selama perlakuan panas [8]. Sementara itu, dapat dilihat pula bahwa kenaikan kekerasan terbesar terjadi dalam waktu 5 menit penuaan. Fenomena ini dikenal sebagai *cluster hardening* dan biasa terjadi pada paduan yang mengandung Cu dan Mg yang tinggi. Ringer *et al.* [9] mengamati fenomena ini pada paduan Al-Cu-Mg dimana 60 % dari total kekerasan yang dicapai hingga kekerasan puncak didapatkan dalam waktu penuaan 5 menit setelah pendinginan cepat.



GAMBAR 1. Pengaruh Cu terhadap respon pengerasan penuaan komposit Al-8Zn-4Mg berpenguat 15 % fraksi volume SiC pada temperatur 200 °C.

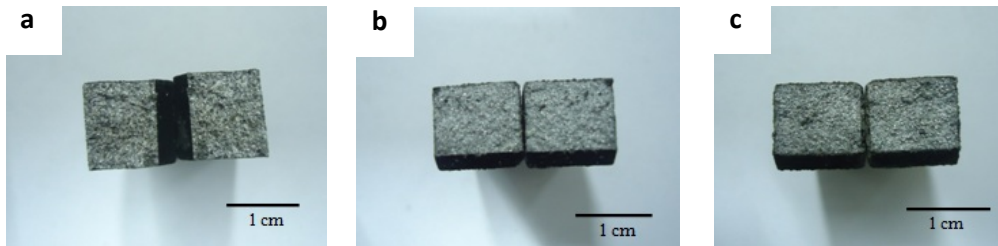
3.2 Pengaruh Cu terhadap Harga Impak

Hasil pengujian impact pada komposit Al-8Zn-4Mg berpenguat SiC 15 % fraksi volume pada kondisi kekerasan puncak setelah penuaan dapat dilihat pada Gambar 2. Dapat dilihat bahwa harga impact mengalami penurunan sebesar 15.2 % pada sampel dengan kandungan Cu sebesar 3 % berat, dibandingkan dengan komposit tanpa paduan Cu. Pada Gambar 2 dapat dilihat juga perbandingan antara harga impact dengan nilai kekerasan pada kondisi kekerasan puncak, yaitu semakin meningkatnya kandungan Cu maka kekerasan meningkat namun harga impact menurun. Hal tersebut dikarenakan menurunnya energi yang bisa diserap oleh material komposit seiring meningkatnya kandungan Cu. Namun bila dibandingkan dengan sampel *as-cast*, harga impact pada kondisi kekerasan puncak memiliki nilai yang lebih tinggi sekitar 31.7 % meskipun kekerasannya juga lebih tinggi. Hal ini menandakan bahwa proses pengerasan penuaan juga memberikan pengaruh dalam meningkatkan ketangguhan material.



GAMBAR 2. Perbandingan harga impact dan nilai kekerasan komposit Al-8Zn-4Mg berpenguat 15 % fraksi volume SiC terhadap variasi komposisi Cu pada kondisi kekerasan puncak dengan temperatur penuaan 200 °C.

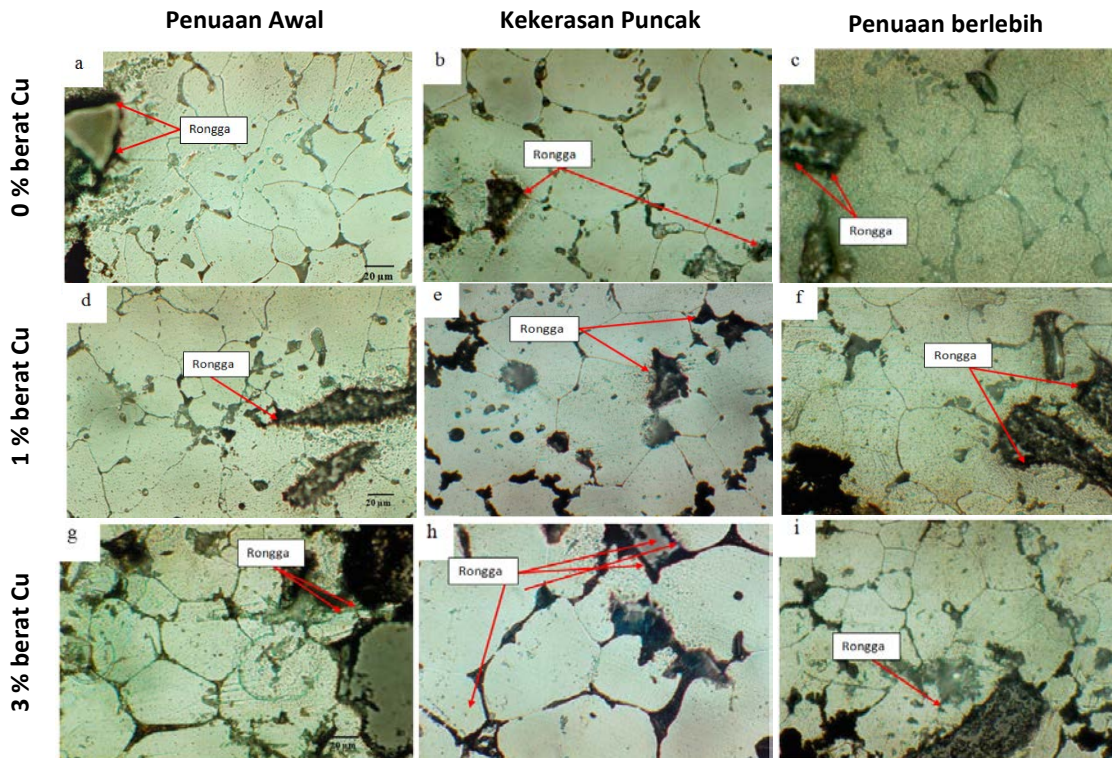
Rata-rata harga impact komposit Al-8Zn-4Mg, yaitu sebesar 45440.86 J/m². Hasil ini berbeda dengan penelitian Rahmalina [10] pada material komposit Al-9Zn-6Mg berpenguat 10 % fraksi volume SiC yang memiliki harga impact sebesar 175559 J J/m². Kontras tersebut dikarenakan berbedanya kandungan SiC, dimana semakin bertambahnya kandungan SiC maka harga impact semakin menurun [5]. Penurunan harga impact seiring keberadaan SiC menghasilkan perpatahan getas seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Dapat diamati bahwa terdapat titik-titik hitam pada Gambar 3 yang diperkirakan merupakan SiC yang mengumpul.



GAMBAR 3. Permukaan patahan impact komposit Al-8Zn-4Mg berpenguat 15 % fraksi volume SiC dengan variasi (a) 0, (b) 1, dan (c) 3 % berat Cu.

3.3 Pengaruh Cu terhadap Evolusi Struktur Mikro selama Pengerasan Penuaan

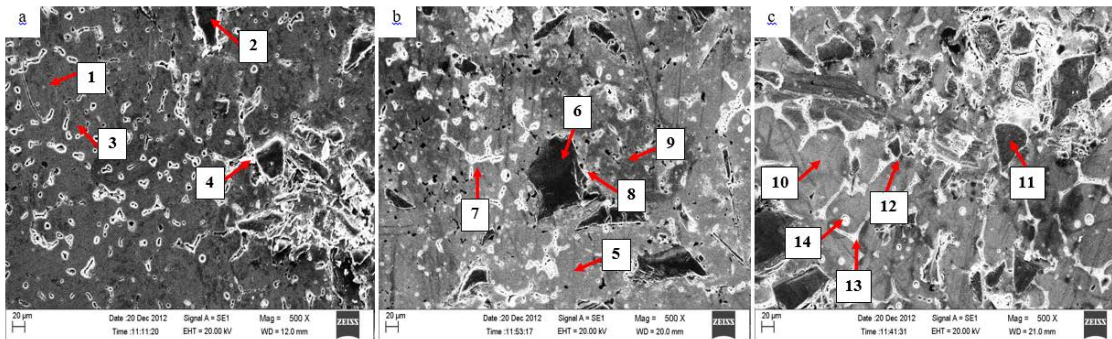
Pada Gambar 4, dapat dilihat bahwa persebaran partikel SiC pada sampel komposit tidak merata. Semakin bertambahnya waktu penuaan, bagian butir terlihat lebih gelap yang diperkirakan karena semakin banyaknya presipitat yang terbentuk karena adanya Cu. Selain itu, dapat dilihat pula adanya rongga di sekitar SiC yang menandakan bahwa Mg tidak membasahi antarmuka SiC dengan matriks dengan baik. Keberadaan rongga tersebut akan menurunkan sifat



GAMBAR 4. Struktur mikro komposit Al-8Zn-4Mg berpenguat 15 % fraksi volume SiC dengan variasi kandungan Cu (a-c) 0, (d-f) 1, dan (g-i) 3 % berat pada kondisi penuaan awal, kekerasan puncak, dan penuaan berlebih pada temperatur 200 °C dengan perbesaran 500x.

mekanik material komposit terutama ketahanan impaknya. Rongga akan menjadi konsentrasi tegangan dan menjadi tempat inisiasi retakan ketika material diberikan beban.

Gambar 5 menunjukkan gambar hasil pengamatan sampel komposit menggunakan SEM dengan perbesaran 500x. Melalui analisa mikro menggunakan EDX pada gambar SEM, komposisi fasa yang mungkin ada dalam paduan Al-Zn-Mg-Cu dapat dilihat pada Tabel 2. Titik 1, 5 dan 10 menunjukkan matriks AlZn dengan karakteristik daerah yang gelap. Partikel SiC dapat dilihat pada titik 2, 6 dan 11 dengan ukuran yang besar dan berwarna gelap. Pada titik 3, 7 dan 12 menandakan adanya fasa MgZn₂ pada daerah gelap dekat dengan garis putih yang diperkirakan batas butir. Selain itu, titik 4 dan 8 menunjukkan fasa MgAl₂O₄ yang merupakan *spinel* untuk mempermudah pembasahan SiC dengan matriks. Penembakan lain pada titik 13 menunjukkan kemungkinan fasa CuMgAl₂ yang hanya terdapat pada kandungan 3 % berat Cu. Hal ini menandakan bahwa pada kandungan tersebut, Cu baru bisa membentuk presipitat CuMgAl₂ secara maksimal. Sementara itu, fasa Mg₃Zn₃Al₂ mungkin terbentuk pada titik 14. Hal ini sesuai dengan literatur, yaitu salah satu fasa yang mungkin terbentuk pada paduan Al-Zn-Mg adalah fasa T(Al₂Mg₃Zn₃) [10].



GAMBAR 5. Gambar SEM permukaan komposit Al-8Zn-4Mg berpenguat 15 % fraksi volume SiC dengan variasi Cu (a) 0, (b) 1, dan (c) 3 % berat pada kondisi kekerasan puncak dengan temperatur penuaan 200 °C.

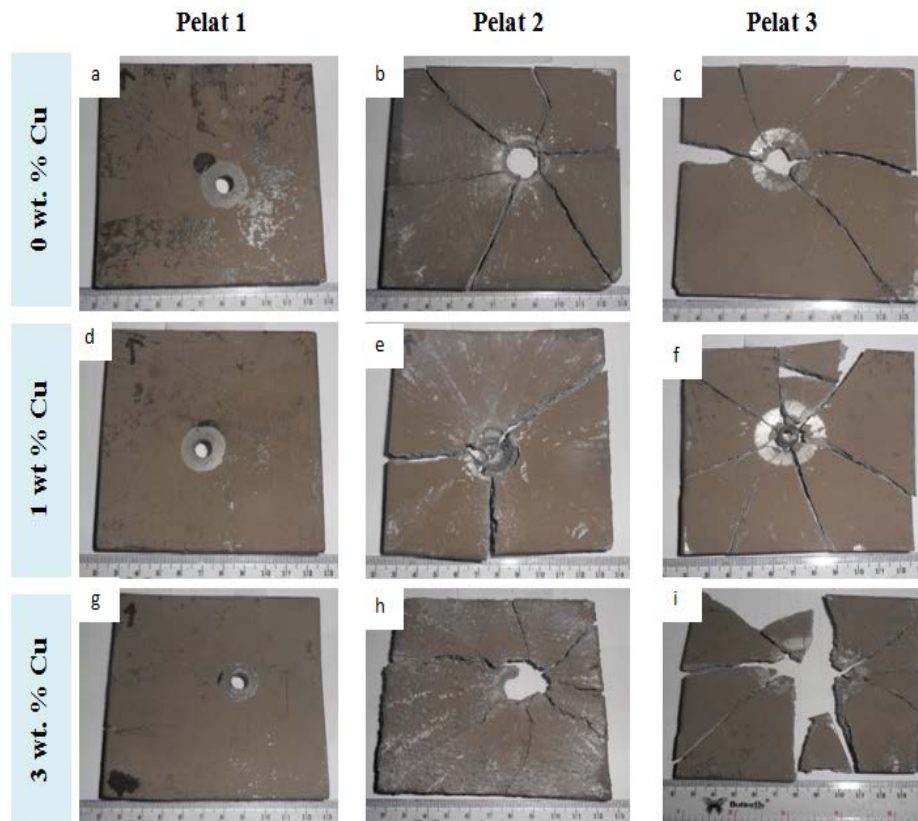
TABEL 2. Hasil pengujian EDS paduan Al-8Zn-4Mg pada kondisi kekerasan puncak dengan temperatur penuaan 200 °C.

Posisi	Rata-rata unsur (% berat)									Kemungkinan
	Zn	Mg	Cu	C	Si	Fe	O	Mn	Al	Fasa
1	5.56	3.35	-	9.73	0.47	0.09	9.04	0.04	Rem	AlZn
2	0.61	0.15	-	26.1	71.7	0.12	0.56	0.10	Rem	SiC
3	7.16	2.59	-	19.9	-	-	0.51	-	Rem	MgZn ₂
4	1.25	1.20	-	51.5	3.36	4.07	19.3	-	Rem	MgAl ₂ O ₄
5	5.89	3.98	-	7.66	-	0.14	1.70	0.08	Rem	AlZn
6	0.68	0.20	0.19	32.5	13.8	0.09	1.23	-	Rem	SiC
7	5.80	1.80	0.75	26.8	0.2	-	1.96	-	Rem	MgZn ₂
8	1.22	13.4	0.2	22.3	2.20	-	27.1	-	Rem	MgAl ₂ O ₄
9	8.70	2.63	0.29	9.58	2.01	0.15	5.72	0.05	Rem	(FeMn) ₂ Si ₂ Al ₁₅
10	4.11	2.50	0.52	7.70	2.54	0.06	6.26	0.02	Rem	AlZn
11	0.66	0.16	0.27	28.5	68.9	0.07	0.59	0.06	Rem	SiC
12	8.70	2.63	0.29	9.58	0.20	0.15	5.72	0.14	Rem	MgZn ₂
13	4.23	3.13	6.12	17.1	-	-	5.63	-	Rem	CuMgAl ₂
14	5.15	2.46	1.19	16.1	-	-	1.51	-	Rem	Mg ₃ Zn ₃ Al ₂

3.4 Pengaruh Cu terhadap Hasil Uji Balistik

Hasil uji balistik komposit Al-8Zn-4mg berpenguat 15 % fraksi volume SiC dengan variasi kandungan Cu sebesar 0, 1 dan 3 % berat pada kondisi kekerasan puncak dapat dilihat pada Gambar 6. Dapat dilihat bahwa hanya pelat pertama yang tidak pecah pada uji balistik tipe III. Sementara itu, pelat ke-3 komposisi 3 % berat Cu mengalami kerusakan yang paling parah. Hal ini menandakan seluruh komposit tidak cukup tangguh untuk menahan beban impak hasil uji balistik dan penambahan Cu dapat membuat kemampuan menahan beban balistik menurun. Selain itu,

persebaran SiC yang tidak merata dapat menyebabkan tegangan pada material menjadi tidak merata pula sehingga menurunkan sifat mekanisnya. Keberadaan rongga pada daerah antarmuka SiC dengan matriks yang ditunjukkan pada Gambar 4 dapat menurunkan kemampuan menahan beban balistik.



GAMBAR 6. Permukaan hasil uji balistik sampel komposit Al-8Zn-4Mg berpenguat 15 % fraksi volume SiC dengan variasi Cu (a-c) 0, (d-f) 1, dan (g-i) 3 % berat setelah penguatan pada temperatur 200 °C selama 2 jam.

4 KESIMPULAN

Dari penelitian yang telah dilakukan, didapatkan kesimpulan sebagai berikut.

1. Penambahan kandungan Cu sebesar 0, 1 dan 3 % berat menghasilkan kekerasan puncak senilai masing-masing 83.36, 83.74 dan 91.17 HRB dengan waktu penuaan selama 2 jam.
2. Harga impact yang dihasilkan setelah penambahan Cu menunjukkan penurunan, yaitu 45440.86, 42561.46 dan 38533.40 J/m² untuk masing-masing kandungan 0, 1 dan 3 % berat Cu secara berturut-turut. Namun, harga impact pada kondisi kekerasan puncak memiliki nilai lebih tinggi 31.7 % dibandingkan dengan produk *as-cast*.
3. Semakin tinggi kandungan Cu, butir akan semakin halus sehingga menyebabkan kekerasan meningkat namun menurunkan harga impact.
4. Presipitat yang diperkirakan terbentuk pada daerah batas butir adalah MgZn₂. Selain itu, kemungkinan presipitat CuMgAl₂ baru hadir pada kandungan Cu 3 wt. %. Fasa intermetalik yang kemungkinan terbentuk adalah (FeMn)₃Si₂Al₁₅.
5. Material komposit Al-8Zn-4Mg berpenguat 15 vol. % SiC pada semua variasi Cu sebesar 0, 1 dan 3 wt. % belum mampu menahan penetrasi balistik tipe III. Kegagalan yang terjadi disebabkan karena adanya penambahan Cu dan *clustering* SiC, rongga pada daerah antar muka SiC dengan matriks yang menurunkan sifat mekanis komposit ini.

ACKNOWLEDGEMENTS

Penelitian ini didanai melalui hibah Hibah Penelitian Unggulan Perguruan Tinggi (PUPT) 2017 dari Kementerian Riset Teknologi, dan Pendidikan Tinggi (Kemristekdikti) Republik Indonesia.

REFERENSI

1. *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*. ASM Handbook. Vol. 2. 1990: ASM International Handbook Committee.
2. *Alloy Phase Diagrams*. ASM Handbook. Vol. 3. 1992: ASM International Handbook Committee.
3. Hadjadj, L. and R. Amira, *The effect of Cu addition on the precipitation and redissolution in Al-Zn-Mg alloy by the differential dilatometry*. Journal of Alloys and Compounds, 2009. **484**(1-2): p. 891-895.
4. Callister W.D. *Material Science and Engineering, 6th edition*. New York : John Wiley & Sons, Inc. 2004.
5. Kheder, A.R.I., Marahleh, G.S., Al-Jamaea, D.M.K., *Strengthening of Aluminum by SiC, Al₂O₃ and MgO*, *Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 2011. p. 533-541.
6. Mondal, Chandan., Mishra, B., K. Jena, Pradipta., Kumar, K. Siva., Bhat, T.B., *Effect of Heat Treatment on The Behavior of an AA7055 Aluminum Alloy During Ballistic Impact*, Elsevier, 2011.
7. Rahmalina, D., *Pengembangan Komposit Aluminium sebagai Material Armor dengan Keunggulan Kinerja Balistik*, Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Depok, 2012.
8. Xi-gang, F., Da-ming, Jiang., Qing-chang, Meng., Bao-you, Zhang., Tao, Wang., *Evolution of Eutectic Structures in Al-Zn-Mg-Cu Alloys during Heat Treatment*. Transaction of Nonferrous, Metal Society of China, 2006. **16**: p. 577-581.
9. Ringer, Simon P., Hono, Kazuhiro., Sakurai, Toshio., Polmear, Ian J., *Cluster Hardening in An Aged Al-Cu-Mg Alloy*, Pergamon, 1997. p. 517-521.
10. Xie, F., et al., *A study of microstructure and microsegregation of aluminum 7050 alloy*. Materials Science and Engineering A, 2003. **355**(1-2): p. 144-153.