

Pengaruh 12 wt. % Zn terhadap Porositas dan Karakteristik Laku Penuaan Paduan Aluminium AA319

Bondan T. Sofyan* dan Ferza Nurina

Departemen Teknik Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik Universitas Indonesia
Kampus UI Depok 16424, Indonesia.

*Corresponding author: bondan@metal.ui.ac.id

Abstrak

Paduan aluminium banyak dipakai pada aplikasi otomotif, karena berat jenisnya yang rendah dan ketahanan korosinya yang baik. Karena alasan ekonomis, proses pengecoran produk otomotif selalu memakai scrap dalam komposisi yang cukup besar, yang mengakibatkan fluktuasi kandungan unsur paduan, seperti antara lain Zn. Studi ini mempelajari pengaruh Zn sebesar 12 wt. % di dalam paduan aluminium AA319, baik terhadap karakteristik setelah pengecoran maupun laku penuaan. Pengujian kekerasan dan kekuatan dilakukan untuk mengamati sifat mekanik paduan, sementara porositas diukur melalui pengujian porositas vakum. Analisis struktur mikro dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik dan SEM (scanning electron microscope) yang dilengkapi dengan EDS (energy dispersive spectroscopy). Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan 12 wt. % Zn pada paduan AA319 menyebabkan sedikit peningkatan porositas, namun nilai kekerasan dan kekuatan mengalami peningkatan cukup signifikan, yang disebabkan adanya transformasi morfologi fasa Al-Fe-Mn-Si dari bentuk huruf cina (chinese script) menjadi jarum (needle). Transformasi ini diperkirakan terjadi karena larutnya Zn di dalam matriks aluminium yang mengubah tegangan permukaan antara matriks dan inti fasa interdendritik. Pengaruh Zn pada karakteristik paduan AA319 setelah laku panas belum dapat dikonfirmasi melalui penelitian ini.

Kata kunci: AA319, Al₂Cu, Al-Fe-Mn-Si, chinese script, penuaan

Pendahuluan

Salah satu paduan cor yang banyak dipakai pada aplikasi otomotif adalah paduan aluminium Al-Si-Cu, karena mampu cor dan sifat mekaniknya yang unggul. Ketahanan korosi dan rendahnya biaya daur ulang dari paduan ini juga menjadikannya ramah lingkungan [1]. Salah satu contoh paduan Al-Si-Cu adalah paduan AA19 yang merupakan paduan hipoeutektik dengan dua tahap pembekuan yang utama, yaitu pembekuan dendrit aluminium diikuti dengan pembekuan fasa silikon. Namun demikian, kehadiran unsur lain seperti Mg dan Cu, dan unsur pengotor seperti Fe, Mn dan Zn, menyebabkan proses pembekuan yang semakin kompleks. Akibatnya, mikrostruktur produk cor Al-Si-Cu terdiri dari beberapa jenis intermetalik dan struktur eutektik. Sehingga, unsur paduan memiliki pengaruh yang sangat besar terhadap karakteristik paduan Al-Si-Cu cor [2].

Penambahan Cu ke dalam paduan eutektik Al-Si meningkatkan mampu alir logam cair dan menurunkan temperatur eutektik Si sekitar $\sim 1,8$ °C untuk setiap 1 wt. % Cu yang ditambahkan. Beberapa sifat mekanik yang lain juga meningkat dengan penambahan Cu, seperti kekuatan tarik dan kekuatan luluh [2]. Tembaga membentuk intermetalik dengan Al yang terbentuk selama proses pembekuan, yang memiliki morfologi seperti balok Al₂Cu, atau dalam bentuk eutektik (Al+Al₂Cu).

Unsur penting lainnya dalam paduan Al-Si-Cu adalah besi (Fe), dimana unsur ini membentuk senyawa intermetalik selama proses pembekuan. Salah satu senyawa yang sering terbentuk adalah fasa β -Al₃FeSi berbentuk pelat yang keras dan rapuh, sehingga keberadaan fasa ini akan menyebabkan penurunan sifat mekanik yang serius [3]. Fasa intermetalik ini juga dapat bertindak sebagai tempat nukleasi fasa Al₂Cu [4], serta bertanggung jawab terhadap terjadinya pelengkungan dengan cetakan pada proses pengecoran bertekanan (*die casting*) [5]. Magnesium

(Mg) diketahui sangat efektif untuk meningkatkan kemampuan paduan untuk dilakupanas, karena menginisiasi pembentukan endapan kasar $Al_5Mg_8Si_6Cu_2$ [6] di dalam matriks aluminium.

Proses pengecoran produk otomotif selalu memakai scrap dalam komposisi yang cukup besar, yang mengakibatkan fluktuasi kandungan unsur paduan, khususnya Zn. Seng (Zn) di dalam aluminium meningkatkan potensial larutan, oleh karenanya digunakan dalam lapisan protektif dan anoda korban. Unsur ini juga memberikan sedikit efek *solid solution strengthening* atau *work hardening* pada aluminium, namun pembentukan presipitat Al-Zn-Mg menjadi dasar dari paduan hasil pengerjaan 7xxx dan paduan pengecoran 7xx.x. Dua fasa dapat terbentuk melalui dekomposisi eutektik dari paduan komersial Al-Zn-Mg, yaitu η -MgZn₂ (heksagonal) dan $Al_2Mg_3Zn_3$ (bcc). Tergantung daripada rasio Zn/Mg, paduan Cu-bebas diperkuat oleh fasa metastabil, baik itu MgZn₂ atau $Al_2Mg_3Zn_3$. Didasarkan pada studi oleh Maloney *et al.* [7] dan Cerezo *et al.* [8] dimana rasio Zn:Mg atau (Zn+Cu):Mg pada pembentukan fasa η' pada mayoritas kasus adalah ~1:1. Sementara itu, pada pembentukan fasa stabil η , rasio Zn:Mg adalah 2:1. Pada paduan Al-Zn-Mg-Cu, Cu dan Al menggantikan Zn pada MgZn₂ membentuk $Mg(Zn,Cu,Al)_2$. Partikel Al_2CuMg juga dapat terbentuk pada paduan ini melalui dekomposisi eutektik dan presipitasi fasa padat. Penambahan Zn dan Mg akan meningkatkan kekuatan, namun di sisi lain akan menurunkan ketahanan korosi aluminium.

Studi ini dilakukan untuk mempelajari pengaruh 12 wt. % Zn pada karakteristik paduan AA319 dalam kondisi as-cast, khususnya kandungan porositas, dan karakteristik setelah pengerasan penuaan. Respons paduan terhadap pengerasan penuaan diamati dengan melakukan serangkaian uji kekerasan serta pengamatan mikrostruktur menggunakan mikroskop optik dan SEM (*scanning electron microscope*).

Metode Penelitian

Paduan dasar AA319 dicor menggunakan dapur skala industri berkapasitas 300 kg. Penghilangan gas terperangkap dilakukan dengan menginjeksikan gas Argon, melalui proses Gas Bubble Floation (GBF). Penambahan Zn sebanyak 12 wt. % dilakukan pada temperatur $679 \pm 5^\circ C$ sebelum penuangan dengan cara mencelupkan menggunakan *plunger*. Paduan dituangkan ke dalam cetakan pasir resin.

Uji porositas dilakukan menggunakan mesin uji Ostek *Porosity Tester* bertekanan -750 mmHg selama 359 detik. Porositas diamati secara visual dengan memotong sampel dan mengamplas permukaannya. Untuk pengujian kekerasan dan proses perlakuan panas, sampel diambil berukuran $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$. Pengujian kekerasan dilakukan dengan metode Brinell berdasarkan standard ASTM E10 dengan indentor bola baja berdiameter 2,5 mm dan beban 31,25 kgf. Lima kali penjejakan dilakukan untuk setiap pengukuran. Proses perlakuan panas diawali dengan proses *solution treatment* pada temperatur $525^\circ C$ selama 1 jam, diikuti dengan pencelupan ke dalam air. Penuaan dilakukan di dalam dapur *muffle* pada temperatur 150 dan $200^\circ C$, selain itu, sebagian sampel dituakan pada temperatur kamar. Struktur mikro diamati menggunakan mikroskop optik dan SEM (*Scanning Electron Microscope*) LEO 420, yang dilengkapi dengan EDXS (*Electron Dispersive X-ray Spectroscopy*) untuk analisis komposisi mikro. Sampel pengamatan mikrostruktur dipreparasi sesuai standar menggunakan etsa 0.5 % Hidrogen Fluoride (HF).

Hasil dan Pembahasan

Karakteristik Produk Cor

Komposisi kimia dari paduan AA 319 *as-cast* tanpa dan dengan penambahan Zn ditampilkan pada Tabel 1, beserta perbandingannya terhadap standar. Secara umum komposisi paduan AA 319 *as-cast* tanpa dan dengan penambahan Zn masuk dalam kisaran komposisi paduan AA 319 standar kecuali Si dan Cu. Selain itu, terlihat bahwa penambahan Zn yang dilakukan adalah sebesar 12,61 wt. %.

Tabel 2 memperlihatkan sifat mekanis pada paduan AA 319 hasil pengecoran dengan 0 wt. % dan 12 wt. % Zn. Paduan *as-cast* cenderung memperlihatkan peningkatan kekuatan tarik

serta kekerasan dengan penambahan 12 wt. % Zn. Hal ini sesuai prediksi dimana penambahan Zn setidaknya akan meningkatkan kekuatan melalui mekanisme penguatan larutan padat.

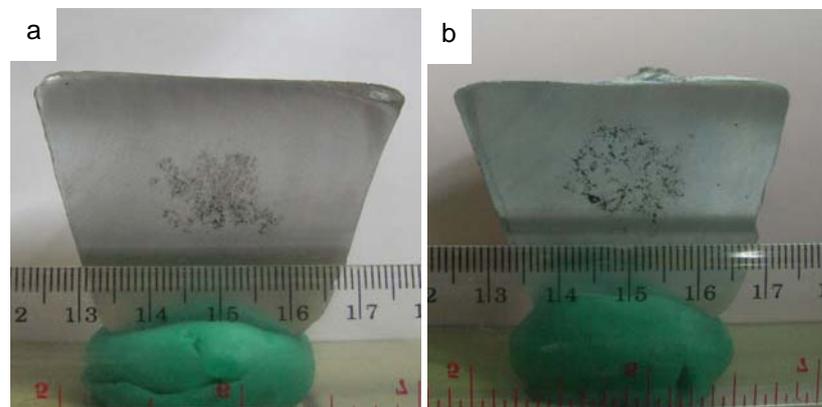
Tabel 1. Komposisi kimia paduan AA319 dengan dan tanpa Zn (dalam wt. %), dibandingkan dengan komposisi standar paduan AA319.

Elemen Paduan	AA319 + 0 wt. % Zn	AA319 + 12 wt. % Zn	Komposisi standar AA 319 <i>as-cast</i>
Si	6,6	7	5,5 – 6,5
Fe	0,49	0,59	1,0 max
Cu	2,54	2,23	3,0 – 4,0
Mg	0,09	0,1	0,1 max
Zn	0,32	12,61	1,0 max
Mn	0,11	0,19	0,5 max
Ti	0,02	0,19	0,25 max
Ni	0,03	0,03	0,35 max

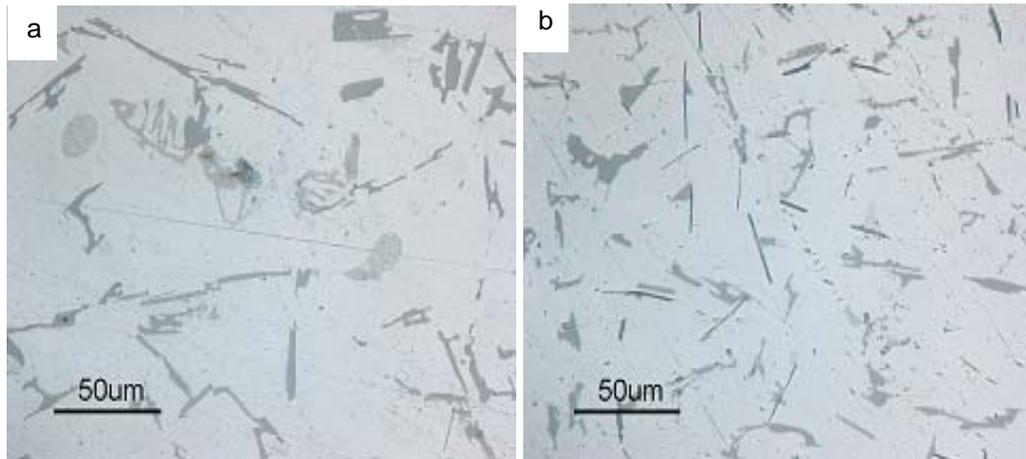
Tabel 2. Sifat mekanis paduan hasil pengecoran dengan penambahan 0 wt. % dan 12 wt. % Zn dibandingkan dengan standar paduan AA 319 *as-cast*

Material	Kekuatan Tarik (MPa)	Kekuatan Luluh (MPa)	Elongasi (%)	Kekerasan (BHN)
AA 319 <i>as-cast</i> dengan 0 wt. % Zn	178,83	57,03	3,2	69,7
AA 319 <i>as-cast</i> dengan 12 wt. % Zn	211,80	55,85	0,9	106,0

Gambar 1 menampilkan foto hasil pengujian porositas pada paduan AA 319 *as-cast* dengan penambahan 0 wt. % dan 12 wt. % Zn. Terlihat bahwa paduan dengan 12 wt. % Zn cenderung membentuk lebih banyak porositas daripada paduan 0 % Zn walaupun tidak secara signifikan. Pembentukan porositas ini bisa diakibatkan oleh kondisi operasional yang terjadi selama proses pengecoran paduan, dimana setelah penambahan Zn tidak dilakukan proses GBF, sehingga kontak antara leburan aluminium dengan udara luar semakin lama, sehingga kecenderungan absorpsi gas hidrogen dan uap air dari atmosfer semakin besar.



Gambar 1. Porositas yang terbentuk pada paduan AA 319 *as-cast* dengan (a) 0 wt. % Zn, (b) 12 wt. % Zn

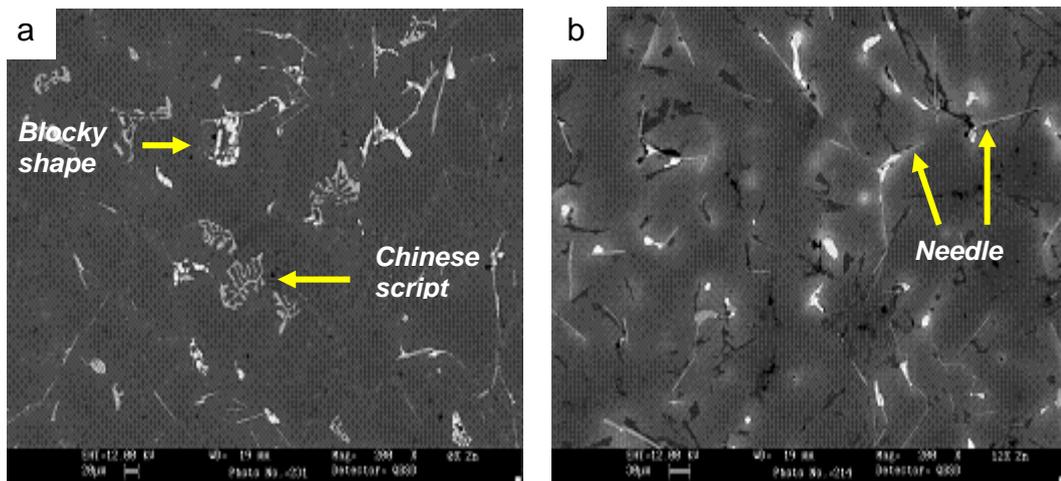


Gambar 2. Struktur mikro paduan AA319 pada kondisi as-cast (a) 0 wt. % Zn, (b) 12 wt. % Zn.

Struktur mikro paduan AA 319 *as-cast* dengan penambahan 0 % dan 12 % Zn tampak pada Gambar 2. Dari gambar tersebut, terlihat bahwa kedua paduan memiliki struktur dendritik α -aluminium dan interdendritik yang merupakan ciri khas paduan aluminium hasil pengecoran. Sebagian pengotor dan unsur paduan larut ke larutan padat pada matriks dan sebagian lagi membentuk partikel intermetalik selama proses solidifikasi^[9]. Fasa intermetalik terbentuk karena aluminium memiliki tingkat keelektronegatifan yang tinggi.

Ukuran dendrit paduan dengan 12 wt. % Zn lebih kecil daripada 0 wt. % Zn, yang juga menjelaskan peningkatan kekuatan paduan akibat penambahan Zn. Hal ini sesuai dengan penelitian terdahulu yang menunjukkan bahwa peningkatan kandungan Zn yang terlarut akan memperhalus jarak antara lengan-lengan dendrit (*dendrite arm spacing* atau DAS)^[10].

Hasil pengamatan SEM paduan AA 319 *as-cast* dengan penambahan 0 wt. % dan 12 wt. % Zn tampak pada Gambar 3. Struktur interdendritik pada gambar tersebut tampak memiliki perbedaan warna dan morfologi, yang mengindikasikan fasa atau komposisi yang berbeda pula. Paduan 0 wt. % Zn memiliki morfologi fasa yang berbentuk seperti huruf cina (*chinese script*) sedangkan paduan 12 wt. % Zn berbentuk seperti jarum (*needle*). Selain itu, fasa berwarna putih pada paduan 0 wt. % Zn banyak yang berbentuk kotak (*blocky shape*).



Gambar 3. Struktur mikro (SEM) paduan AA 319 *as-cast* dengan (a) 0 wt. % Zn, dan (b) 12 wt. % Zn

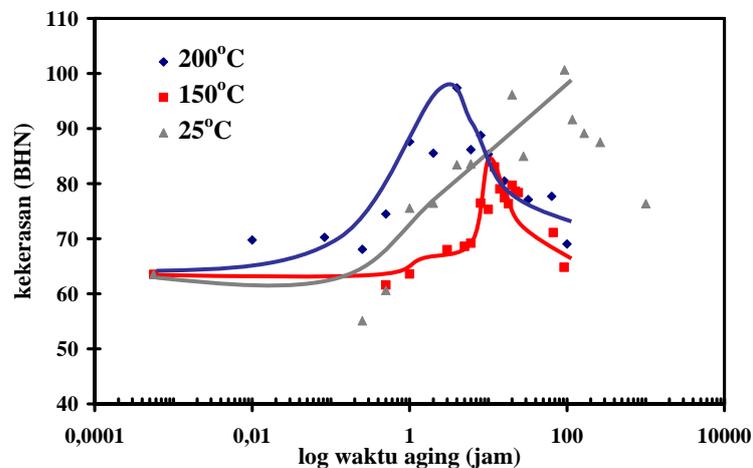
Identifikasi masing-masing fasa dilakukan menggunakan EDXS, yang rinciannya tidak ditampilkan dalam makalah ini. Fasa berwarna abu-abu muda yang berbentuk seperti huruf cina (*chinese script*) pada paduan 0 wt. % Zn (Gambar 3 (a)) mengindikasikan adanya fasa Al-Fe-Mn-Si. Fasa ini terbentuk melalui reaksi eutektik karena adanya kandungan Mn serta kelarutan padat Fe dan Si (0,05 % dan 1,65 %) yang jauh dibawah kelarutan cairnya^[9]. Selain itu, paduan ini juga

banyak mengandung fasa CuAl_2 . Hal ini merujuk ke diagram fasa biner antara Al – Cu, kondisi *as-cast* (temperatur ruang) membawa paduan pada daerah dua fasa $\alpha+\beta$. Fasa CuAl_2 paduan 0 wt. % Zn memiliki bentuk seperti kotak (*blocky shape*) (Gambar 3(a)). Morfologi ini terbentuk dengan kecepatan pendinginan yang relatif lambat^[1] di dalam cetakan pasir, sekaligus mengkonfirmasi sebab dari perbedaan ukuran struktur dendrit antara foto struktur mikro dan mikroskop optik.

Fasa berwarna abu-abu muda yang paduan 12 wt. % Zn (Gambar 3 (b)) juga mengindikasikan adanya fasa Al-Fe-Mn-Si. Akan tetapi, fasa ini mengalami perubahan morfologi dimana bentuk seperti tulisan cina (*chinese script*) dimiliki oleh paduan 0 wt. % Zn berubah menjadi bentuk jarum tampak pada paduan 12 wt. % Zn. Morfologi jarum cenderung akan meningkatkan kegetasan paduan akibat adanya konsentrasi tegangan. Peran Zn dalam perubahan morfologi ini mungkin disebabkan oleh perubahan tegangan permukaan matriks akibat larutnya Zn yang berstruktur CPH di dalam aluminium yang berstruktur FCC. Selain itu menurut literatur^[10], dengan peningkatan kandungan Si akan terbentuk fasa α yang dilanjutkan fasa β -Al-Fe-Si. Fasa α memiliki struktur kristal kubik dan muncul pada mikrostruktur sebagai eutektik *Chinese script*. Sedangkan, fasa β umumnya muncul dalam bentuk struktur jarum (*needle*). Peningkatan kadar Si memang terjadi pada kedua paduan ini, dimana paduan 0 wt. % Zn mengandung 6,6 wt. % Si dan meningkat hingga 7 wt. % Si pada paduan 12 wt. % Zn.

Penambahan Zn terlihat oleh naiknya kandungan unsur tersebut dalam matriks. Matriks yang hanya mengandung Al (100 wt. % Al) dimiliki oleh paduan 0 wt. % Zn. Sedangkan, paduan 12 wt. % Zn memiliki matriks kaya Al yang juga mengandung Zn (14,12 wt. %). Kelarutan padat Zn pada aluminium mencapai 82,8 wt. %^[11] sehingga penambahan 12 wt. % Zn akan mengakibatkan larutnya Zn pada matriks aluminium yang kemudian berperan dalam penguatan larutan padat (*solid solution strengthening*).

Respons Pengerasan Penuaan



Gambar 4. Respons pengerasan penuaan paduan AA319 dengan 12 wt. % Zn pada beberapa temperatur.

Gambar 4 menampilkan kurva pengerasan presipitasi paduan AA 319 dengan penambahan 12 wt. % Zn selama *ageing* pada suhu 25 °C (*natural ageing*), 150 °C dan 200 °C (*artificial ageing*). Kesalahan relatif penjejakan sampel *natural ageing* sebesar 4,19 %, sementara pada *artificial ageing* 150 °C dan 200 °C berturut-turut 2,6 % dan 3,14 %.

Pada kondisi *natural ageing*, paduan mengalami inkubasi selama satu jam dan dilanjutkan dengan peningkatan kekerasan. Namun, kekerasan yang dicapai saat *natural ageing* belum mencapai titik puncaknya. Sedangkan, pada paduan *artificial ageing* terlihat bahwa proses inkubasi berlangsung selama tiga jam dan satu jam pada temperatur *ageing* masing-masing 150 °C dan 200 °C yang dilanjutkan dengan peningkatan kekerasan hingga puncak. Kekerasan

maksimumnya tercapai setelah 12 jam untuk temperatur *ageing* 150 °C dan 4 jam untuk temperatur 200 °C.

Secara teoritis, semakin tinggi temperatur *ageing*, kekerasan maksimum yang tercapai akan semakin rendah dalam waktu yang lebih singkat. Hal ini disebabkan oleh laju pertumbuhan presipitat yang dikendalikan oleh laju migrasi atom, dimana presipitasi meningkat dengan naiknya temperatur *ageing*. Sedangkan, pada temperatur *ageing* yang rendah, laju nukleasi presipitat lebih tinggi daripada laju pertumbuhan presipitatnya sehingga menghasilkan presipitat halus yang tersebar dalam matriks. Presipitat ini lebih efektif dalam menghambat pergerakan dislokasi. Oleh karenanya, menghasilkan kekerasan yang lebih tinggi. Namun, peningkatan kekerasan tidak tampak pada hasil pengujian kekerasan paduan *artificial ageing* temperatur 150 dan 200 °C. Hal ini mungkin disebabkan oleh banyaknya porositas seperti yang tampak pada Gambar 1, dimana sebagian besar porositas berukuran lebih besar dari ukuran indenter. Namun demikian, tidak tertutup kemungkinan adanya perilaku atau respon yang berbeda pada paduan yang berbeda pula. Untuk memastikan penyebab dari penyimpangan karakteristik *ageing* ini, perlu dilakukan pengamatan ulang yang lebih akurat.

Secara umum, terjadi dua tahap pengerasan pada temperatur *ageing* yang rendah dan pengerasan tunggal pada temperatur *ageing* yang tinggi, dimana ada satu atau lebih tahapan antara yang terlampaui ^[11]. Fasa θ yang stabil tidak langsung terbentuk, akan tetapi terjadi beberapa tahap yang membutuhkan waktu untuk mencapainya. Tahap pertama adalah pembentukan *cluster* atom kaya Cu yang koheren pada kisi Al. Pada temperatur *ageing* 150 °C, ada dua tipe *cluster* yang terdeteksi, yakni GP I dan GP II (presipitat θ''). Kekuatan maksimumnya dicapai saat θ'' terbentuk. Sedangkan pada temperatur *ageing* 200 °C, presipitat θ'' (GP II) tidak terbentuk melainkan fasa θ' yang berpresipitasi sebelum presipitat stabil θ . Saat θ terdeteksi, paduan dikatakan *overaged* dan kekuatannya menurun. Untuk memastikan tahapan presipitat pada paduan AA 319 dengan penambahan 12 % Zn, diperlukan pengamatan lebih lanjut dengan menggunakan TEM.

KESIMPULAN

1. Penambahan 12 wt. % Zn pada paduan AA 319 *as-cast* akan meningkatkan kekuatan tarik dan kekerasan, sehingga konsekuensinya menurunkan keuletan.
2. Secara umum, struktur mikro paduan AA 319 dengan kandungan 12 wt. % Zn *as-cast* memiliki struktur dendritik dan interdendritik yang komposisinya terdiri dari : kristal silikon, CuAl_2 dan Al-Fe-Mn-Si yang tersebar dalam matriks kaya Al yang mengandung Zn.
3. Penambahan 12 wt. % Zn pada paduan AA 319 *as-cast* menurunkan ukuran DAS.
4. Penambahan 12 wt. % Zn mengubah morfologi fasa Al-Fe-Mn-Si dari bentuk huruf cina (*chinese script*) menjadi jarum (*needle*) yang mengakibatkan peningkatan kegetasan paduan.
5. Penambahan 12 wt. % Zn cenderung meningkatkan porositas pada paduan *as-cast*.
6. Unsur paduan Zn yang berlebih tidak membentuk suatu fasa atau partikel baru, namun tetap larut dalam matriks aluminium sehingga penguatan yang terjadi diperkirakan adalah penguatan larutan padat (*solid solution strengthening*) sedangkan pengaruh Zn dalam proses pengerasan presipitasi (*precipitation hardening*) belum dapat dikonfirmasi pada penelitian ini.
7. Paduan AA 319 dengan penambahan 12 wt. % Zn mencapai kekerasan puncak sebesar 97,36 BHN setelah 4 jam untuk temperatur *ageing* 200 °C dan 83 BHN setelah 12 jam untuk temperatur *ageing* 150 °C. Penurunan kekerasan yang terjadi disebabkan oleh banyaknya porositas yang terbentuk.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai melalui skema Hibah Penelitian PHK A2 Departemen Metalurgi dan Material 2005. Terima kasih kepada PT. Astra Honda Motor atas penyediaan fasilitas pengecoran dan beberapa alat laboratorium.

DAFTAR PUSTAKA

1. J.E. Hatch (ed.), *Aluminium: Properties and Physical Metallurgy* (Ohio, OH: American Society for Metals, 1995), 143.

2. M.A. Moustafa, F.H. Samuel, H.W. Doty and S. Valtierra, *Int. J. Cast Metals Res.*, 14 (2002), 235.
3. A. Couture, *AFS Int. Cast Metals J.*, (1981), 9.
4. P.N. Crepeau, *AFS Trans.* 103 (1995), 361.
5. M. Dash and M. Makhlof, *J. Light Metals*, 1 (2001), 251.
6. P. Ouellet, F.H. Samuel, *J. Mat. Sci.*, 34 (1999), 4671.
7. S.K. Maloney, K. Hono, I.J. Polmear, S.P. Ringer, *Scripta Materialia*, 41, 10 (1999), 1031.
8. G. Sha, and A. Cerezo, *Acta Materialia*, 52 (2004), 4503
9. L. Backerud *et al.*, *Solidification Characteristics of Aluminum Alloys, Volume 2 : Foundry Alloys.* AFS/Skanaluminium. Sweden. 1990.
10. J.R. Davis, *Alloying : Understanding The Basics.* ASM International. Ohio. 2001.
11. R.E. Smallman, *Modern Physical Metallurgy and Materials Engineering Science, Process and Application*, 6th ed. Elsevier Pub. USA. 1998.