

## PERAN 1 DAN 9 wt. % Zn DALAM PROSES Pengerasan PRESIPITASI PADUAN ALUMINIUM AA319

Bondan T. Sofyan, Sari Susanti, dan Ridwan R. Yusfranto

Departemen Teknik Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Depok 16424, Indonesia

E-mail: 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 peran Zn sebesar 1 dan 9 wt. % di dalam proses pengerasan presipitasi paduan aluminium AA319. Pengujian kekerasan dan kekuatan dilakukan untuk mengamati sifat mekanik paduan, sementara respons paduan terhadap pengerasan presipitasi diikuti melalui pengujian kekerasan. Evolusi struktur mikro diamati dengan menggunakan mikroskop optik dan SEM (*scanning electron microscope*) yang dilengkapi dengan EDS (*energy dispersive spectroscopy*). Distribusi unsur terlarut dipelajari dengan *X-ray mapping* pada mode *back scattered electron*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan Zn sebesar 1 dan 9 wt. % pada paduan AA319 meningkatkan kekerasan dan kekuatan. Selain itu, juga terjadi 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. Penambahan Zn meningkatkan respons paduan terhadap penuaan alami, namun tidak menyebabkan perubahan signifikan pada penuaan buatan di temperatur 200 °C. Zn diketahui tersegregasi di sekitar fasa Al<sub>2</sub>Cu.

### Abstract

**The Role of 1 and 9 wt.% Zn in Precipitation Hardening of AA319 Aluminium.** Aluminium alloys are widely used for automotive application due to its low density and high corrosion resistance. For economic reason, casting of automotive products always uses aluminium scrap as charging materials that may result in fluctuation of content of alloying element, such as Zn. This research studies the role of Zn in precipitation hardening of AA319 aluminium alloys. Hardness and tensile testing were conducted to study the mechanical properties of the alloys, while ageing response was followed by hardness measurements. Evolution of microstructures was observed by using optical microscope and SEM (*scanning electron microscope*) equipped with EDS (*energy dispersive spectroscopy*). Distribution of solute elements was detected by x-ray mapping and formation of nanoprecipitates was observed by using TEM (*transmission electron microscope*). Research results showed that addition of 1 and 9 wt. % Zn on AA310 alloys increases strength and hardness. Morphology transformation of Al-Fe-Mn-Si phase from chinese script into needle shape was detected, and may be due to dissolution of Zn in aluminium matrix that change the interfacial stress between the matrix and interdendritic phases. Addition of Zn also increased response of alloys to natural ageing but no significant change was detected for artificial ageing at 200 °C. Age hardening was contributed by the formation of θ' (Al<sub>2</sub>Cu) nanoprecipitates. Zn was segregated on the periphery of Al<sub>2</sub>Cu phase.

*Keywords: AA319, Al<sub>2</sub>Cu, Al-Fe-Mn-Si, chinese script, precipitation hardening*

---

### 1. 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  $Al_2Cu$ , atau dalam bentuk eutektik ( $Al+Al_2Cu$ ).

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  $\beta-Al_5FeSi$  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  $Al_2Cu$  [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  $Al_3Mg_8Si_6Cu_2$  [6] di dalam matriks aluminium. Penambahan Sb 0.03 – 1 wt. % dan perlakuan panas diketahui meningkatkan kekuatan, ketangguhan dan ketahanan kejutan termal yang signifikan [7]. Proses perlakuan panas juga banyak diandalkan untuk memperoleh paduan cor Al-Si-Cu yang berkekuatan dan berketahanan creep yang tinggi [8-10].

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  $\eta$ - $MgZn_2$  (heksagonal) dan  $Al_2Mg_3Zn_3$  (bcc). Tergantung daripada rasio Zn/Mg, paduan Cu-bebas diperkuat oleh fasa metastabil, baik itu  $MgZn_2$  atau  $Al_2Mg_3Zn_3$ . Didasarkan pada studi oleh Maloney *et al.* [11] dan Cerezo *et al.* [12] dimana rasio Zn:Mg atau (Zn+Cu):Mg pada pembentukan fasa  $\eta'$  pada mayoritas kasus adalah  $\sim 1:1$ . Sementara itu, pada pembentukan

fasa stabil  $\eta$ , rasio Zn:Mg adalah 2:1. Pada paduan Al-Zn-Mg-Cu, Cu dan Al menggantikan Zn pada  $MgZn_2$  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 penambahan 1 dan 9 wt. % Zn pada karakteristik paduan AA319 dalam kondisi as-cast, dan pada respons paduan terhadap pengerasan presipitasi. Respons paduan terhadap pengerasan penuaan diamati dengan melakukan serangkaian uji kekerasan serta pengamatan mikrostruktur menggunakan mikroskop optik, SEM (*scanning electron microscope*).

## 2. 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 Floatation (GBF). Penambahan Zn sebanyak 1 dan 9 wt. % dilakukan pada temperatur  $679 \pm 5$  °C sebelum penuaan dengan cara mencelupkan menggunakan *plunger*. Paduan dituangkan ke dalam cetakan pasir resin.

Untuk pengujian kekerasan dan proses perlakuan panas, sampel diambil berukuran  $10 \times 10 \times 10$  mm<sup>3</sup>. Pengujian kekerasan dilakukan dengan metode Brinell berdasarkan standard ASTM E10 dengan indenter bola baja berdiameter 2,5 mm dan beban 31,25 kgf, serta Vickers dengan beban 5 kg. Lima kali penjejakan dilakukan untuk setiap pengukuran. Pengujian tarik dilakukan sesuai standar JIS Z2201. Proses perlakuan panas diawali dengan proses *solution treatment* di dalam dapur garan pada temperatur 525 °C selama 1 jam, diikuti dengan pencelupan ke dalam air. Penuaan dilakukan di dalam dapur minyak silikon pada temperatur 200 °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). Pemetaan sinar-x (*x-ray mapping*) dilakukan pada SEM Phillips XL-30 CP.

## 3. Hasil dan Pembahasan

### Pengaruh Zn terhadap Karakteristik Paduan AA319 Tuang.

Hasil uji komposisi paduan terdapat pada Tabel 1, dan terlihat bahwa material AA319 dasar telah mengandung sebesar 0.33 wt. % Zn, yang berasal dari *return scrap*.

**Tabel 1. Hasil pengujian komposisi paduan AA319.0 dengan penambahan 0, 1, dan 9 wt. % Zn dibandingkan dengan komposisi standar paduan AA319.0.**

Unsur	Komposisi sampel hasil pengecoran (wt. %)			Komposisi standar AA319.0 <sup>[8]</sup> (wt. %)
	0 % Zn	1 % Zn	9 % Zn	
Cu	2.51	2.52	2.33	2—4
Si	6.63	6.41	7.30	5—7
Mg	0.09	0.10	0.10	0,5 maks
Zn	0.33	1.01	9.07	1,0 maks
Fe	0.49	0.49	0.62	0,8 maks
Mn	0.11	0.11	0.19	0,5 maks
Ni	0.03	0.03	0.02	0,3 maks
Ti	0.02	0.02	0.02	0,2 maks
Al	<i>balance</i>	<i>balance</i>	<i>balance</i>	<i>balance</i>

Penambahan Zn pada material dasar menghasilkan paduan mengandung masing-masing adalah 1.01, dan 9.07 wt. % Zn, yang menunjukkan bahwa hasil pengecoran sesuai dengan perhitungan *material balance* yang dilakukan.

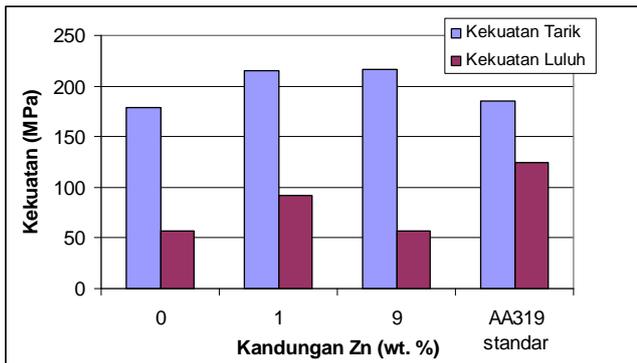
Kandungan Cu pada seluruh sampel berada dalam kisaran komposisi yang diizinkan. Sementara itu, kandungan Si pada sampel 0 dan 1 wt. % Zn sesuai dengan standar, namun pada sampel 9 wt. % Zn, kandungan Si sedikit di atas standar yang ditetapkan. Kenaikan kadar Si ini diperkirakan disebabkan karena adanya pasir runtuh pada proses penuangan. Kandungan unsur-unsur minor lainnya seluruhnya berada dalam batasan standar.

Gambar 1 menunjukkan nilai kekuatan tarik dan kekuatan luluh paduan AA319 dengan variasi kandungan Zn. Dari Gambar 1 tersebut terlihat bahwa penambahan 1 wt. % Zn ke dalam paduan AA319 secara signifikan menaikkan kekuatan dan menurunkan keuletan. Peningkatan kekuatan semakin besar dengan penambahan 9 wt. % Zn, yang diikuti dengan penurunan keuletan. Hal ini diperkirakan terjadi melalui mekanisme *solid solution strengthening*, dimana Zn terlarut sebagai substitusi pada kisi atom aluminium. Perbedaan jari-jari atom aluminium dan seng, yaitu 0.143 nm dan 0.133 nm, menyebabkan terjadinya regangan kisi dengan kehadiran Zn yang kemudian meningkatkan kekuatan. Peningkatan kegetasan akibat kehadiran Zn ini yang diperkirakan sebagai penyebab retaknya *cylinder head* setelah proses permesinan.

Gambar 2 menampilkan foto struktur mikro hasil pengecoran sampel dengan kandungan 0, 1, dan 9 wt. % Zn dengan menggunakan cetakan pasir. Dari Gambar 2 tersebut tampak bahwa seluruh sampel hasil pengecoran memiliki stuktur mikro dendritik. Tampak tidak adanya perbedaan mikrostruktur yang signifikan dengan adanya penambahan 9 wt.% Zn pada kondisi coran. Namun, pengamatan lebih detail menunjukkan bahwa ukuran lengan dendrit (*dendrit arm spacing*) tampak mengecil

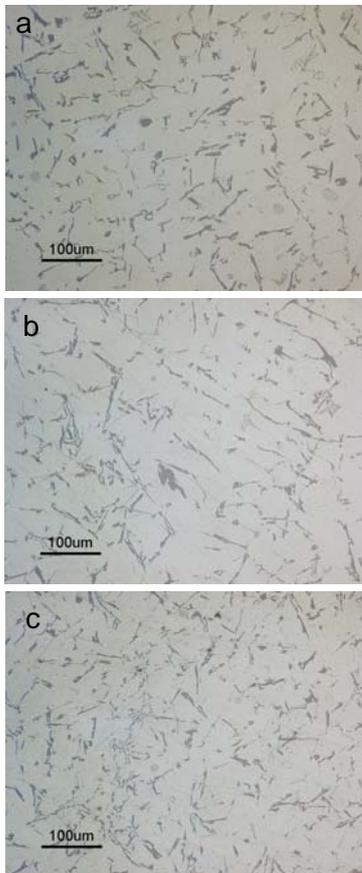
dengan semakin tingginya kandungan seng di dalam paduan. Hal ini sesuai dengan literatur yang menyatakan bahwa penambahan Zn memperhalus dendrit [9].

Gambar 3 menampilkan foto SEM dari seluruh sampel AA319 dengan kandungan Zn dari 0 wt. % hingga 9 wt. %. Foto SEM ini mengkonfirmasi bahwa terdapat tiga jenis fasa kedua di dalam paduan, yaitu: (i) Si primer yang berwarna abu-abu gelap, (ii) Al<sub>2</sub>Cu, yang berwarna terang, serta (iii) Al(Fe,Mn)Si yang berwarna abu-abu terang. Fasa Si primer dan Al<sub>2</sub>Cu memiliki morfologi yang sama pada seluruh sampel, yang menunjukkan bahwa kehadiran fasa ini tidak banyak dipengaruhi oleh kandungan Zn. Namun demikian, sangat menarik untuk mengamati bahwa fasa Al(Fe,Mn)Si mengalami perubahan bentuk yang signifikan dengan penambahan Zn. Pada paduan AA319 dasar (Gambar 3 (a)) sebagian besar fasa Al(Fe,Mn)Si memiliki bentuk *chinese script* seperti dijelaskan dalam banyak literatur. Namun demikian, dengan penambahan Zn, terjadi kecenderungan perubahan morfologi fasa ini menjadi jarum (*needle-like*). Pada AA319 dengan kandungan 1 wt. % Zn (Gambar 3 (b)), masih ditemui sebagian kecil fasa Al(Fe,Mn)Si yang berbentuk *chinese script*, namun sebagian besar memiliki bentuk jarum. Dengan kandungan Zn sebesar 9 wt. % (Gambar 3 (e)) terlihat jelas bahwa tidak ada lagi fasa Al(Fe,Mn)Si dalam bentuk *chinese script*, seluruhnya telah menjadi bentuk jarum dengan rasio aspek yang tinggi. Perubahan morfologi fasa ini diperkirakan berperan penting dalam peningkatan kegetasan material dengan kadar Zn yang tinggi. Rasio aspek yang tinggi menjadi sumber konsentrasi tegangan di dalam material yang menyebabkan material menjadi mudah patah ketika menerima beban. Unsur Zn yang larut di dalam matrik aluminium menyebabkan perubahan tegangan antar permukaan fasa kedua dan matriks yang dapat menyebabkan perubahan arah orientasi pertumbuhan (*preferred orientation*) fasa kedua selama proses pembekuan yang kemudian menyebabkan terjadinya perubahan morfologi fasa.



Gambar 1. Pengaruh kandungan Zn terhadap kekuatan tarik dan kekuatan luluh paduan AA319

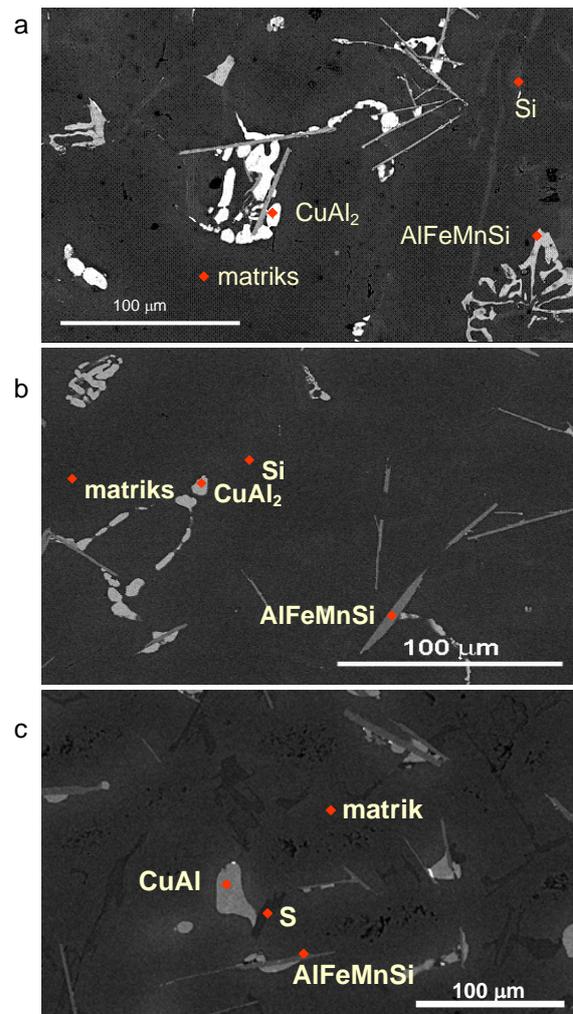
signifikan pada seluruh paduan setelah proses penuaan pada temperatur kamar. terjadi cukup tinggi yakni sekitar 40 BHN untuk AA319 dengan 0 dan 1 wt. % Zn, dan sekitar 90 BHN pada paduan dengan kandungan 9 wt. % Zn. Dari Gambar 4 juga dapat dilihat bahwa daerah inkubasi pada *natural ageing* pada AA319 dengan 1 wt. % Zn lebih panjang dibandingkan pada kandungan 9 wt. % Zn. Hal ini mengindikasikan adanya peran Zn dalam melepas *vacancy* di dalam paduan sehingga pembentukan endapan nano menjadi lebih cepat. Zn yang memiliki ukuran atom 7 % lebih kecil dari pada ukuran atom aluminium bertendensi untuk menempati posisi interstisi di dalam kisi aluminium. Dalam posisi ini, Zn tidak banyak berpengaruh terhadap keberadaan *vacancy*. Namun, ketika konsentrasi Zn semakin besar, akumulasi Zn dalam posisi interstisi akan berpotensi untuk mengumpulkan *vacancy* dan mempercepat pertumbuhan endapan nano.



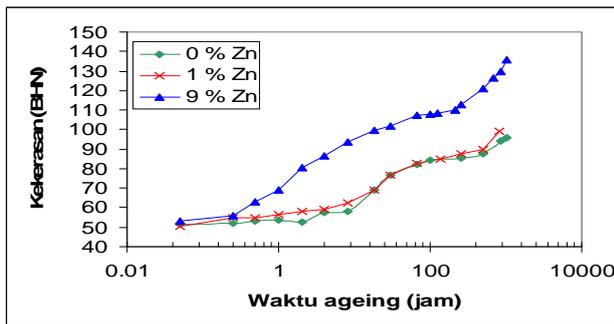
Gambar 2. Struktur mikro paduan AA319 tuang dengan kandungan (a) 0, (b) 1 dan (c) 9 wt. % Zn.

**Pengaruh Zn terhadap Respons Paduan terhadap Penuaan Alami.**

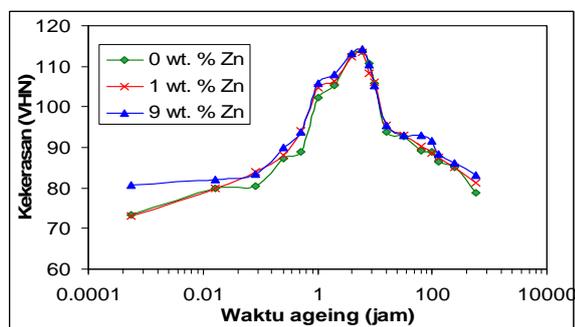
Gambar 4 merupakan kurva pengerasan pengendapan alami pada paduan AA319.0 dengan variasi penambahan Zn. Dari Gambar 4 tersebut tampak bahwa secara umum terjadi peningkatan kekerasan yang cukup



Gambar 3. Foto SEM AA319 dengan (a) 0 % Zn, (b) 1 wt. % Zn, dan (c) 9 wt. % Zn.



Gambar 4. Pengaruh kandungan Zn terhadap respons pengerasan penuaan alami paduan AA319.



Gambar 5. Pengaruh kandungan Zn terhadap respons pengerasan penuaan buatan paduan AA319 pada temperatur 200 °C.

**Pengaruh Zn terhadap Respons Paduan terhadap Penuaan Buatan pada Temperatur 200 °C.** Kurva pengerasan *artificial ageing* pada temperatur 200 °C disajikan pada Gambar 5, dimana dapat dilihat bahwa nilai kekerasan puncak paduan AA 319 dengan kandungan 0, 1 dan 9 wt. % Zn hampir sama ( $\Delta H_{VHN} \sim 0.35\%$ ). Pada ketiga paduan tersebut, kekerasan puncak berhasil dicapai pada waktu yang sama yaitu 6 jam. Nampak pada gambar bahwa perbedaan nilai kekerasan dari ketiga paduan pada kondisi *as-quenched* hampir sama dengan pada kondisi kekerasan puncak. Perbedaan ini mengarah pada mekanisme penguatan larutan padat (*solid solution strengthening*) dari matriks aluminium oleh partikel Zn. Namun karena partikel Zn memiliki diameter atom yang hampir sama dengan partikel Al ( $\varnothing \text{Al} = 0.143 \text{ nm}$ ,  $\varnothing \text{Zn} = 0.133 \text{ nm}$ ), maka regangan kisi (*lattice strain*) yang dihasilkanpun tidak maksimum. Mengacu pada diagram fasa biner Al-Zn, pemanasan pada temperatur 200 °C mengarah pada pembentukan fasa tunggal  $\alpha$ . Oleh karenanya, efek penguatan akibat penambahan Zn dari 0 wt. % ke 9 wt. % di dalam matriks tidak terlihat.

Dari Gambar 5 dapat dilihat juga bahwa pada ketiga paduan terlihat adanya daerah inkubasi hingga sekitar 10 menit dan satu buah daerah *plateau* yaitu berada pada selang waktu antara 2 jam hingga 4 jam. Pada paduan aluminium-tembaga, terdapat daerah inkubasi dan satu

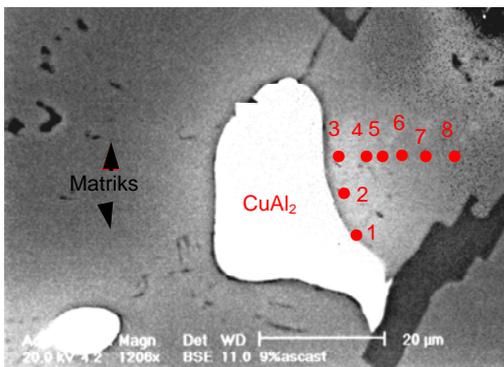
daerah *plateu* pada kurva kekerasan *ageing*. Daerah inkubasi terjadi pada awal proses *ageing* yang terjadi akibat efek *quenching*. Proses *quenching* membuat atom-atom tidak bergerak, sehingga *vacancy* juga tak bergerak selain itu proses *quenching* meninggalkan *residual stress* yang tinggi di dalam paduan. Pada awal proses *ageing*, peningkatan kekerasan terjadi sangat lambat karena *vacancy* sebagai tempat pengintian presipitat belum tersedia dalam jumlah yang cukup dan peningkatan temperatur digunakan untuk menghilangkan *residual stress* terlebih dahulu. Kenaikan suhu yang terjadi pada proses *ageing* menyebabkan atom-atom bergetar lebih intensif, sehingga atom-atom melompat meninggalkan tempatnya [13]. Hal ini menyebabkan *vacancy* pada suatu jaringan akan bertambah [13]. Semakin tinggi temperatur, *vacancy* akan bertambah dan ada beberapa *vacancy* yang bergabung membentuk *double vacancy* [14]. Bertambahnya jumlah *vacancy* pada suatu jaringan akan mempermudah proses pengintian presipitat. Pada daerah *plateu* terjadi transformasi fasa metastabil yang telah ada sebelumnya menjadi fasa lain atau tumbuhnya fasa metastabil baru. Pada Al-Cu daerah *plateu* disebabkan karena proses transformasi GP zone menjadi presipitat  $\theta'$ . Pada daerah inkubasi dan *plateu* laju pengerasannya lebih lambat sehingga dihasilkan kekerasan yang tidak jauh berbeda pada selang waktu dimana daerah inkubasi dan *plateu* terjadi.

Pada puncak kekerasan paduan AA 319 dengan penambahan 1 dan 9 wt. % seng, telah diketahui bahwa presipitat yang terbentuk adalah  $\theta'$ . Hal ini akan dibuktikan dari pengamatan *diffraction pattern* di bawah TEM yang tidak disampaikan pada makalah ini. Karena nilai kekerasan yang mirip antara paduan AA 319 dan paduan AA 319 dengan penambahan 1 dan 9 wt. % seng, maka kemungkinan pada puncak kekerasan, paduan AA 319 juga memiliki presipitat  $\theta'$ . Hal-hal ini mengindikasikan bahwa *ageing* pada temperatur 200 °C pada paduan AA 319 dengan penambahan 1 dan 9 wt. % seng tidak menyebabkan pembentukan GP Zone tetapi langsung membentuk fasa metastabil  $\theta'$ .

#### Distribusi Unsur Terlarut selama Proses Penuaan.

Hasil pemetaan x-ray (*x-ray mapping*) untuk paduan dalam kondisi *as-cast* tidak ditampilkan pada makalah ini. Namun hasilnya menunjukkan bahwa sebagian besar unsur Si yang terdapat dalam paduan AA319 dengan 9 wt. % Zn membentuk fasa interdendritik, baik itu Si-primer maupun Al(Fe,Mn)Si. Pola distribusi yang serupa ditemukan pada unsur Cu, Fe dan Mn, dimana mayoritas masing-masing berperan dalam pembentukan fasa  $\text{CuAl}_2$  maupun Al(Fe,Mn)Si. Pola distribusi unsur Fe dan Mn yang nyaris sama menunjukkan bahwa keduanya saling terikat satu sama lain membentuk fasa interdendritik yang sama dan kemungkinan pembentukan fasa lain yang hanya melibatkan kehadiran salah satu unsur tersebut sangat kecil.

Sementara itu, unsur Mg yang tidak turut dalam pembentukan fasa interdendritik larut sempurna di dalam matriks. Namun pola distribusinya menunjukkan kecenderungan Mg untuk tersegregasi membentuk *cluster* di sekitar dinding-dinding fasa yang mengandung Si, baik itu Al(Fe,Mn)Si maupun Si-primer. Kelarutan Zn dalam Al yang tinggi (hampir 82.8 wt %) mengakibatkan Zn larut sempurna di dalam matriks. Hal yang menarik disini, terkait pola distribusi Zn di dalam matriks adalah kecenderungan Zn untuk tersegregasi pada dinding-dinding fasa CuAl<sub>2</sub>. Hal ini ditunjukkan pada analisa BSE (Gambar 6) yang disertai dengan hasil EDXS untuk tiap-tiap titik pengujian (Tabel 2). Pada titik-titik pengujian yang sangat dekat dengan dinding antar fasa, konsentrasi Zn menjadi maksimum dan terus berkurang seiring dengan bertambahnya jarak titik pengujian terhadap dinding antar fasa CuAl<sub>2</sub> dengan matriks. Kondisi ini timbul diperkirakan karena baik posisi Cu dan Zn saling bersebelahan di dalam tabel periodik dan keduanya memiliki beda elektronegativitas yang kecil. Unsur Cu dan Zn sangat mungkin membentuk interaksi kimia yang mendorong pembentukan batas antar fasa akibat adanya *miscibility gap* yang terbentuk pada diagram fasa Al-Zn sehingga unsur Zn tidak larut sempurna.



**Gambar 6.** Foto *Back-Scattered Electron* (BSE) paduan AA319 dengan 9 wt. % Zn *as-cast* yang menunjukkan segregasi distribusi Zn pada area sekitar dinding fasa CuAl<sub>2</sub>

**Tabel 2.** Rangkuman data hasil EDXS paduan AA319 dengan 9 wt. % Zn *as-cast* berdasarkan foto BSE (Gambar 6)

Posisi	Rata-rata unsur (at. %)		
	Cu	Zn	Al
1	5.71	6.49	87.79
2	3.99	7.55	88.46
3	6.84	5.63	87.53
4	2.01	6.44	91.55
5	1.55	5.81	92.64
6	1.49	4.41	94.11
7	0.68	3.68	95.64
8	--	3.62	96.38

#### 4. Kesimpulan

Dari hasil penelitian diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Penambahan kadar Zn sebesar 1 dan 9 wt. % pada paduan AA 319 mengakibatkan:
  - a. Pembentukan struktur interdendritik yang lebih halus dengan jarak antar lengan dendrit (*dendrite arm spacing*) yang lebih rapat sehingga mendorong adanya peningkatan nilai kekuatan tarik (UTS) sebesar 11,91 %
  - b. Perubahan morfologi fasa Al(Fe,Mn)Si dari bentuk *Chinese script* menjadi bentuk jarum (*needle*)
  - c. Peningkatan pembentukan fasa CuAl<sub>2</sub> pada kondisi *as-cast*
  - d. Berkurangnya kuantitas fasa Al(Fe,Mn)Si pada kondisi *as-cast*, *as-quenched* maupun *overaged*, sehingga meningkatkan kuantitas unsur Fe dan Mn di dalam matriks yang diindikasikan turut berpartisipasi dalam mekanisme retardasi
  - e. Peningkatan nilai kekerasan pada perilaku penuaan di temperatur ruang, namun tidak menyebabkan perubahan yang signifikan pada temperatur penuaan 200 °C
2. Struktur mikro dari paduan AA319 dengan dan tanpa penambahan Zn pada kondisi *as-cast* terdiri atas dendrit (matriks) Al dengan fasa interdendritik antara lain CuAl<sub>2</sub>, Al<sub>3</sub>(Fe,Mn)Si<sub>2</sub> dan Si-primer. Proses *solution treatment* terhadap kedua paduan mengakibatkan pelarutan dari struktur interdendritik CuAl<sub>2</sub> membentuk partikel Cu-bebas di dalam matriks
3. Kekerasan puncak tertinggi dicapai oleh paduan AA319 dengan 0, 1 dan 9 wt. % Zn pada proses penuaan di 200 °C selama 6 jam, dimana kekerasan meningkat sebesar 8,76 % dari kondisi *as-cast*. Kekerasan yang lebih tinggi dicapai oleh AA319 dengan kandungan 9 wt. % Zn melalui penuaan pada temperatur ruang, dimana setelah 1002 jam terjadi peningkatan kekerasan sebesar 30,48 % dari kondisi *as-cast*
4. Kondisi kekerasan puncak (penuaan pada 200 °C selama 6 jam) untuk paduan AA319 dengan 1 dan 9 wt. % Zn disebabkan oleh pembentukan presipitat θ'-(CuAl<sub>2</sub>)

#### Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini didanai melalui skema Riset Unggulan Universitas Indonesia 2006. Terima kasih kepada PT. Astra Honda Motor atas penyediaan fasilitas pengecoran. Terima kasih kepada Electron Microscope Unit, University of Sydney, Australia yang telah menyediakan peralatan TEM dan SEM.

**Daftar Acuan**

- [1] J.E. Hatch (Eds.), Aluminium: Properties and Physical Metallurgy, Ohio (1995) 143
- [2] M.A. Moustafa, F.H. Samuel, H.W. Dotty, 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, M. Makhlof, J. Light Metals, 1 (2001) 251.
- [6] P. Ouellet, F.H. Samuel, J. Mat. Sci., 34 (1999) 4671.
- [7] T. Ito, A. Hashimoto, Canadian Patent No. CA 1180988, 15 Jan. 1985.
- [8] G. Laslaz, US Patent No. 20060133949, 22 June. 2006.
- [9] T. Aikawa, A. Ishikawa, S. Hara, US Patent No. 5996471, 7 Dec. 1999.
- [10] Q-T, Fang, J.C. Lin, C. E. Garesche, H. Haddenhorst, US Patent No. 6773666, 10 August. 2004.
- [11] S.K. Maloney, K. Hono, I.J. Polmear, S.P. Ringer, Scripta Materialia 41, 10 (1999) 1031.
- [12] G. Sha, A. Cerezo, Acta Materialia, 52 (2004) 4503
- [13] L. Backerud *et al.*, Solidification Characteristics of Aluminum Alloys, vol. 2, Foundry Alloys, AFS/Skanaluminium, Sweden, 1990.
- [14] R. Honorius, Pengantar Material Sains I Buku Atom-Molekul-Padat, Tabernakelindo, Yogyakarta, 2004.