



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PROSES PENGECORAN VAKUM DAN ANALISIS EVOLUSI  
MIKROSTRUKTUR PADUAN Al-Zn-Mg-Cu DENGAN  
VARIASI KOMPOSISI SELAMA AGEING PADA  
TEMPERATUR 120 °C DAN 190 °C**

**SKRIPSI**

**ABDAN SYAKUURA  
0706268152**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI METALURGI DAN MATERIAL  
DEPOK  
JULI 2011**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PROSES PENGECORAN VAKUM DAN ANALISIS EVOLUSI  
MIKROSTRUKTUR PADUAN Al-Zn-Mg-Cu DENGAN  
VARIASI KOMPOSISI SELAMA AGEING PADA  
TEMPERATUR 120 °C DAN 190 °C**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik**

**ABDAN SYAKUURA  
0706268152**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI METALURGI DAN MATERIAL  
DEPOK  
JULI 2011**

**Universitas Indonesia**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri, dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar.**

**Nama : Abdan Syakuura**

**NPM : 0706268152**

**Tanda Tangan : **

**Tanggal : 13 Juli 2011**

## HALAMAN PENGESAHAN

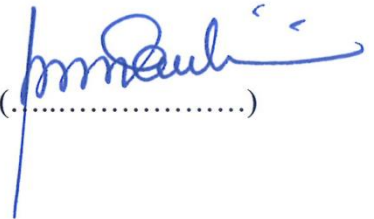
Skripsi ini diajukan oleh:

Nama : Abdan Syakuura  
NPM : 0706268152  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul Skripsi : Proses Pengecoran Vakum dan Analisis Evolusi Mikrostruktur Paduan Al-Zn-Mg-Cu dengan Variasi Komposisi selama *Ageing* pada Temperatur 120 °C dan 190 °C

**Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.**

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Bondan Tiara Sofyan, M.Si



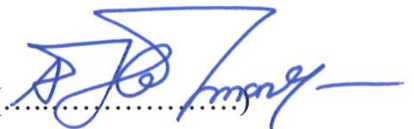
(.....)

Penguji 1 : Prof. Dr. Ir. Anne Zulfia, M.Phil.Eng



(.....)

Penguji 2 : Dr. Ir. Akhmad Herman Yuwono, M.Phil.Eng



(.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 13 Juli 2011



## KATA PENGANTAR

Syukur Alhamdulillahirabbil'alamin saya panjatkan, karena diatas satu rancangan dan kepastian Ilmu-Nya sehingga skripsi ini dapat terselesaikan. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mendapatkan gelar Sarjana Teknik jurusan Teknik Metalurgi dan Material pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya amat menyadari bahwa terselesaikannya skripsi ini, tak luput dari bantuan dan bimbingan berbagai pihak, dimulai dari masa perkuliahan sampai penyusunan skripsi ini. Oleh karena itu saya mengucapkan terima kasih kepada:

- 1) Prof. Dr. Ir. Bondan Tiara Sofyan, M.Si selaku dosen pembimbing yang telah dengan tulus dan tegas mendidik saya menjadi mahasiswa yang bertanggung jawab dalam berbagai hal, merekomendasikan saya dalam penelitian kolaborasi antara Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia dengan Australian Centre for Microscopy & Microanalysis (ACMM), The University of Sydney (Oktober 2010-Maret 2011), membantu dan membimbing saya selama kerja praktek, tugas akhir sampai penyusunan dan terselesaikannya skripsi ini;
- 2) Prof. Simon Ringer, selaku CEO ACMM yang telah memfasilitasi dan membimbing penelitian saya di University of Sydney, Australia;
- 3) seluruh staf dan keramahtamahan ACMM: Dr. Gang Sha, selaku *supervisor* penelitian saya, Dr. Ross Marceau, Dr. Bulent Gun, Shaun Bulcock, Adam Sikorski, Dr. Gwénaëlle Proust, Dr. Junhai Xia, Kelvin Xie, Rupam Bandopadhyay, Anais Auvray yang telah banyak membantu penelitian saya;
- 4) Prof. Dr. Ir Bambang Suharno selaku kepala Departemen Teknik Metalurgi dan Material FTUI;
- 5) Prof. Dr. Ir. Anne Zulfia, M.Phil.Eng selaku pembimbing akademis dan salah satu dosen penguji skripsi saya;
- 6) Dr. Ir. Akhmad Herman Yuwono, M.Phil.Eng selaku dosen penguji dan koordinator skripsi Departemen Metalurgi dan Material FTUI;
- 7) Ir. Rini Riastuti, M.Sc selaku kepala Lab Kimia DTMM FTUI yang selalu memberikan doa dan semangat kepada saya;

- 8) seluruh staf akademik dan non akademik DTMM FTUI yang telah mendidik dan membantu saya selama masa perkuliahan;
- 9) kedua orang tua saya, Drs. Sudiarto Hendri Setiawan dan Dra. Mulyati yang tak pernah henti mendidik dan mendoakan saya, terima kasih telah mengajarkan saya Ilmu yang sesungguhnya, saya sangat menyayangi kalian;
- 10) Ana Wardatul Jannah, yang dengan cinta dan kasih sayang tak pernah henti memberikan semangat dan pencerahan kepada saya;
- 11) Farida Rifqan dan Ghulam Zaky Dzulqarnain adik-adik saya yang membawa keceriaan di rumah, kalian pasti bisa menjadi lebih baik dari saya;
- 12) Bpk. Deden Djaelani, SH dan Ibu Hildawati yang telah menjadi orang tua kedua saya, membimbing dan mendidik saya seperti anaknya sendiri;
- 13) Drs. Norman Setiyadi, *téh* Irni Dwi Ihsaniati, Ru'yatunniisa Qarnitsani yang menjadi seperti kakak dan adik kandung saya, ikut membantu membimbing dan menghibur saya;
- 14) rekan TA, Faris Ammar Bujakesuma, rekan pra-TA: Dwi Rahmalina ST, MT, Hesti Ibrahim, Henry Suropati, Muhammad Ridwan, Muhammad Nurrahman, Novian Lamanda Putra atas segala kerja sama, diskusi dan berbagai masukannya untuk saya;
- 15) rekan-rekan Metalurgi 2007, sahabat-sahabat saya A.Md Merio Alpan, Tegar Al Gafhani, Muhammad Isa, Muhammad Ridza, Rahmat Adi Widiyanto, Shabilla Anjani, Ayu Mutiara Farkhah, Putri Harisstyaningtias dan kerabat lain alumni SMA Proklamasi 1945 Bogor, alumni SMAN 104 Jakarta, serta seluruh pihak yang secara langsung maupun tidak langsung telah membantu saya dalam menyelesaikan skripsi ini.

Akhir kata, saya menyatakan mudah-mudahan dinul Islam satu sistem penataan yang saling memakmurkan dan menghamparkan kasih sayang dari Ilmu-Nya dapat menjiwai kita semua. Semoga skripsi ini dapat membawa manfaat bagi perkembangan ilmu metalurgi dan material.

Depok, Juni 2011

Penulis

**Universitas Indonesia**

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI  
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

---

---

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Abdan Syakuura  
NPM : 0706268152  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Departemen : Teknik Metalurgi dan Material  
Fakultas : Teknik  
Jenis Karya : Skripsi

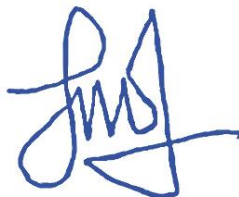
Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneklusif** (*Non-exclusive Royalty-Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul:

Proses Pengecoran Vakum dan Analisis Evolusi Mikrostruktur Paduan Al-Zn-Mg-Cu dengan Variasi Komposisi selama *Ageing* pada Temperatur 120 °C dan 190 °C

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya tanpa meminta izin dari saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya,

Dibuat di : Depok  
Pada tanggal : 13 Juli 2011  
Yang menyatakan



(Abdan Syakuura)

## ABSTRAK

Nama : Abdan Syakuura  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul : Proses Pengecoran Vakum dan Analisis Evolusi Mikrostruktur Paduan Al-Zn-Mg-Cu dengan Variasi Komposisi selama *Ageing* pada Temperatur 120 °C dan 190 °C

Paduan aluminium-seng-magnesium-tembaga memiliki peranan penting dalam industri penerbangan. Pada penelitian ini dilakukan investigasi sistematis untuk mengeksplorasi evolusi mikrostruktur paduan Al-Zn-Mg-Cu dengan beberapa 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 dan 190 °C. Melalui investigasi ini didapatkan pengaruh tiap elemen penyusun paduan yang dapat digunakan untuk memberikan gambaran mengenai kombinasi komposisi yang optimum pada pengerasan selama *ageing*. Selain itu fenomena *rapid hardening*, yang umumnya terjadi pada paduan aluminium seri 2xxx dan 7xxx juga berusaha diungkap dalam penelitian ini. *Rapid hardening* merupakan fenomena pengerasan yang terjadi pada saat awal proses *ageing* akibat adanya *clustering* atom terlarut.

Unit dapur induksi vakum baru di University of Sydney digunakan untuk mempersiapkan semua paduan. Mikrostruktur hasil pengecoran diamati dengan mikroskop optik. *Billet* hasil pengecoran dirol menjadi pelat yang lebih tipis dengan ketebalan 1.5-2 mm. Pelat ini kemudian diberikan perlakuan panas *solution treatment-ageing*. Pengukuran kekerasan dilakukan pada sampel pada beberapa variasi waktu *ageing* untuk mendapatkan kurva *age hardening* dan mengungkap efek *rapid hardening*. Karakterisasi TEM dilakukan untuk memahami evolusi mikrostruktur presipitat.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kekerasan paduan semakin meningkat dengan penambahan Zn dan Mg karena adanya pembentukan presipitat halus  $MgZn_2$  dan  $Mg_3Zn_3Al_2$  yang berbentuk *spherical*. Penambahan Cu memberikan efek peningkatan kekerasan cukup signifikan hingga komposisi Zn dan Mg mencapai 2.5 at. %. Fenomena *rapid hardening* ditemukan dalam paduan Al-Zn-Mg-Cu selama *ageing* pada temperatur 190 °C.

Kata kunci:

Paduan Al-Zn-Mg-Cu, pengecoran induksi vakum, pengerolan panas, *age hardening*, *rapid hardening*, *clustering*.

## ABSTRACT

Name : Abdan Syakuura  
Majoring : Metallurgy and Materials Engineering  
Title : Vacuum Casting Process and Analysis of Microstructure Evolution of Al-Zn-Mg-Cu Alloys with Variation in Composition during Ageing at 120 °C and 190 °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 dan 190 °C. Following this investigation, the role of each element remains to be established for describing the optimum combination of composition during age hardening. Aside from that, rapid hardening (RH) phenomenon, which is commonly happened in the aluminium 2xxx and 7xxx series is also revealed through this research. Rapid hardening is the hardening phenomena which is occurred in the early stage of ageing treatment due to clustering of solute atom.

A new induction vacuum casting unit at the University of Sydney was employed to prepare all Al alloys. Casting microstructures was evaluated using optical microscopy. The cast billets were then further rolled into strips with a thickness of 1.5-2 mm. These strips were solution treated and aged. Hardness test was performed on these aged samples in order to reveal hardening effect. TEM characterization was performed to understand the precipitation microstructure evolution.

The results show that the hardness of the alloy increases with the addition of Zn and Mg concentration due to the formation of nano-spherical precipitates  $MgZn_2$  and  $Mg_3Zn_3Al_2$ . Copper addition gives a significant effect on the increasing of the hardness up to 2.5 at. % of Mg and Zn. Rapid hardening phenomenon was revealed in the Al-Zn-Mg-Cu alloys during ageing at 190 °C.

Keywords:

Al-Zn-Mg-Cu alloys, induction vacuum casting, hot rolling, age hardening, rapid hardening, clustering.

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	vi
ABSTRAK .....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	xiii
DAFTAR TABEL .....	xxi
DAFTAR LAMPIRAN .....	xxii
DAFTAR SINGKATAN .....	xxiii
<b>BAB 1 PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang Penelitian .....	1
1.2 Permasalahan.....	7
1.3 Tujuan Penelitian .....	8
1.4 Ruang Lingkup Penelitian.....	8
1.4.1 Material .....	8
1.4.2 Parameter Penelitian.....	8
1.4.3 Tempat Penelitian.....	10
1.5 Manfaat Penelitian .....	10
1.4 Manfaat Penelitian .....	4
<b>BAB 2 STUDI LITERATUR .....</b>	<b>11</b>
2.1 Aluminium dan Paduannya .....	11
2.1.1 Pengaruh Unsur Paduan pada Aluminium .....	11
2.1.2 Aluminium seri 7xxx .....	16
2.1.3 Al-Zn-Mg-Cu .....	19
2.2 Pengecoran Aluminium.....	22
2.2.1 Pengecoran Induksi pada Keadaan Vakum.....	22
2.2.2 Proses Pembekuan.....	24
2.2.3 Penyusutan Volume karena Pembekuan .....	28
2.2.4 Cacat Pengecoran .....	30

2.2.5 Homogenisasi.....	34
2.3 Proses Pengerolan Aluminium.....	35
2.3.1 Proses Pengerolan Dingin pada Aluminium .....	37
2.3.2 Proses Pengerolan Panas pada Aluminium.....	38
2.3.3 Cacat Pengerolan pada Aluminium.....	39
2.4 Pengerasan Penuaan ( <i>Age Hardening</i> ) Paduan Aluminium.....	42
2.4.1 <i>Solution Treatment</i> .....	44
2.4.2 <i>Quenching</i> .....	44
2.4.3 <i>Artificial Ageing</i> .....	45
2.5 Fenomena Pengerasan Presipitasi Paduan Al-Zn-Mg-Cu.....	45
2.5.1 Diagram Fasa Kesetimbangan Al-Zn-Mg.....	46
2.5.2 <i>GP Zone</i> dan Pengerasan Presipitasi .....	49
2.5.3 <i>Clustering</i> pada Paduan Al-Zn-Mg-Cu.....	52
2.5.4 <i>Rapid Hardening</i> .....	53
2.5.5 <i>Ductility</i> dan PFZ yang Dikontrol oleh <i>Nanocluster</i> .....	55
<b>BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN</b> .....	56
3.1 Diagram Alir Penelitian .....	56
3.2 Alat dan Bahan.....	57
3.2.1 Alat.....	57
3.2.2 Bahan .....	59
3.3 Proses Pengecoran Paduan Aluminium Seng Magnesium Tembaga.....	59
3.3.1 Persiapan <i>Ingot</i> untuk Pengecoran .....	59
3.3.1.1 <i>Ingot</i> Aluminium .....	59
3.3.1.2 <i>Ingot</i> Seng.....	62
3.3.1.3 <i>Ingot</i> Magnesium.....	63
3.3.1.4 <i>Ingot</i> Tembaga.....	63
3.3.1.5 Perhitungan Neraca Massa .....	64
3.3.1.6 Penimbangan <i>Ingot</i> .....	66
3.3.2 Persiapan Pengecoran Paduan Al-Zn-Mg-Cu.....	67
3.3.2.1 Pengaktifan Sistem Pendingin Mesin .....	68
3.3.2.2 <i>Preheating</i> Material Umpan .....	69
3.3.2.3 <i>Preheating Crucible</i> dan Cetakan.....	70
3.3.2.4 Penyusunan Material Umpan, <i>Thermocouple</i> , <i>Crucible</i> dan Cetakan di dalam Mesin .....	71

3.3.2.5 Pengaktifan Gas Argon dan Indutherm Vacuum Tilting Casting Machine VTC200 .....	73
3.3.3 Pengecoran Paduan Al-Zn-Mg-Cu.....	75
3.3.3.1 Pengaturan Parameter Pengecoran pada Mesin.....	75
3.3.3.2 Proses Pengecoran Paduan Al-Zn-Mg-Cu dengan Indutherm Vacuum Tilting Casting Machine VTC200.....	77
3.3.3.3 Proses Penuangan Logam Cair .....	79
3.3.3.4 Pengambilan, Pengecekan Visual Sampel dan Pemberian Label.....	80
3.4 Homogenisasi Paduan Al-Zn-Mg-Cu .....	81
3.5 Pengamatan Mikrostruktur <i>as Cast</i> pada Beberapa Sampel .....	83
3.6 Pengujian Komposisi Sampel .....	84
3.6.1 Persiapan Pengambilan Sampel Uji Komposisi.....	84
3.6.2 Pengeboran <i>Billet</i> untuk Pengambilan Sampel Uji Komposisi.....	84
3.7 Pengerolan Panas .....	86
3.7.1 Pemotongan <i>Billet</i> untuk Pengerolan.....	86
3.7.2 <i>Preheating</i> Sampel dan <i>Roll Mill</i> .....	88
3.7.3 Proses Pengerolan Panas .....	88
3.7.4 Pemotongan Pelat Hasil Rol .....	90
3.8 Perlakuan Panas Paduan Al-Zn-Mg-Cu .....	91
3.8.1 <i>Solution Treatment</i> pada <i>Salth Bath</i> .....	91
3.8.2 <i>Quenching</i> dengan Air .....	92
3.8.3 <i>Ageing</i> pada <i>Oil Bath</i> .....	93
3.9 Karakterisasi Sampel Paduan Al-Zn-Mg-Cu .....	95
3.9.1 Pengujian Kekerasan <i>Vickers</i> .....	95
3.9.1.1 Persiapan Sampel untuk Pengujian Kekerasan.....	95
3.9.1.2 Pengujian Kekerasan dengan LECO Vickers Hardness Tester LV4700 <sub>AT</sub> .....	96
3.9.1.3 Pemberian Label dan <i>Storage</i> Sampel.....	98
3.9.2 Pengamatan Mikrostruktur <i>as Heat Treatment</i> dan <i>as Rolled</i> .....	99
3.9.3 Karakterisasi dengan SEM, HRSEM dan EDS.....	100
3.9.3.1 Persiapan Sampel.....	100
3.9.3.2 Pengamatan dengan SEM, HRSEM dan EDS.....	104
3.9.4 Karakterisasi dengan <i>Transmission Electron Microscope</i> (TEM).....	107
3.9.4.1 Persiapan Sampel.....	107
3.9.4.2 Pengamatan dengan TEM.....	114



<b>BAB 4 ANALISIS PROSES PENGECORAN, HOMOGENISASI DAN PENDEROLAN PANAS PADUAN Al-Zn-Mg-Cu.....</b>	<b>116</b>
4.1 Analisis Proses Pengecoran Induksi Vakum.....	116
4.1.1 Analisis Persen Berat (wt. %) Elemen yang Hilang pada Proses Pengecoran .....	116
4.1.2 Analisis Cacat Pengecoran .....	124
4.2 Analisis Proses Homogenisasi .....	127
4.3 Analisis Proses Penderolan Panas .....	129
4.3.1 Analisis Pengaruh Temperatur Proses .....	130
4.3.2 Analisis Cacat Penderolan.....	132
<b>BAB 5 ANALISIS PENGARUH Zn DAN Mg DALAM PADUAN Al-Zn-Mg-Cu SELAMA AGEING PADA TEMPERATUR = 120 °C .....</b>	<b>139</b>
5.1 Analisis Kurva <i>Age Hardening</i> .....	139
5.2 Evolusi Mikrostruktur selama <i>Ageing</i> pada Temperatur 120 °C .....	142
5.2.1 Observasi Struktur Mikro dengan Mikroskop Optik .....	142
5.2.2 Observasi Struktur Mikro dengan SEM, HRSEM dan EDS.....	146
5.2.3 Observasi Struktur Nano dengan <i>Transmission Electron Microscope</i> (TEM) .....	151
5.3 Pengaruh Zn dan Mg terhadap Evolusi Mikrostruktur Paduan Al-Zn-Mg-Cu selama <i>Ageing</i> pada Temperatur 120 °C.....	153
5.4 Teknik Difraksi <i>Back Scatter Electron</i> (BSE) untuk Karakterisasi Sampel ..	156
<b>BAB 6 ANALISIS PENGARUH Cu DALAM PADUAN AL-Zn-Mg-Cu SELAMA AGEING PADA TEMPERATUR 120 °C.....</b>	<b>161</b>
6.1 Analisis Kurva <i>Age Hardening</i> .....	161
6.2 Pengaruh Cu terhadap Evolusi Mikrostruktur Paduan Al-Zn-Mg-Cu selama <i>Ageing</i> pada Temperatur 120 °C.....	163
<b>BAB 7 ANALISIS FENOMENA RAPID HARDENING DALAM PADUAN AL-Zn-Mg-Cu SELAMA AGEING PADA TEMPERATUR 190 °C .</b>	<b>168</b>
7.1 Analisis Kurva <i>Age Hardening</i> .....	168
7.2 Analisis Struktur Nano pada Fenomena <i>Rapid Hardening</i> Paduan Al-Zn-Mg-Cu .....	171
7.3 Fenomena <i>Precipitate Free Zone</i> pada Paduan Al-Zn-Mg-Cu.....	172
<b>BAB 8 KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>174</b>
8.1 Kesimpulan .....	174
8.2 Saran.....	176
<b>DAFTAR ACUAN.....</b>	<b>177</b>

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1.</b>	Efek $MgZn_2$ dan $MgZn_2$ dengan Mg sisa terhadap sifat mampu tarik dari <i>wrought</i> 95 % Al; specimen 1.59 mm, dicelup pada air dingin dari 470 °C <sup>[31]</sup> .....	13
<b>Gambar 2.2.</b>	Efek Zn pada paduan Al-1.5Cu-Mg dan Al-1.5Cu-3Mg. Paduan dengan 1 % Mg dilaku panas pada 495 °C, sedangkan paduan 3 %Mg pada 460 °C. Seluruh sample di- <i>quench</i> pada air dingin, dituakan selama 12 jam pada 135 °C <sup>[31]</sup> .....	13
<b>Gambar 2.3.</b>	Aplikasi paduan aluminium seri 2xxx dan 7xxx pada pesawat Boeing 777 ( <i>courtesy of Brian Smith</i> ).....	20
<b>Gambar 2.4.</b>	Vacuum Tilting Machine VTC200 <sup>[45]</sup> .....	23
<b>Gambar 2.5.</b>	Kurva pendinginan pada logam murni mengilustrasikan derajat <i>undercooling</i> yang dibutuhkan untuk mengawali proses pembekuan <sup>[47]</sup> .....	24
<b>Gambar 2.6.</b>	Ilustrasi transisi dari <i>flat</i> ke struktur dendritik pada antarmuka cair-padat. Bagian kiri adalah permukaan cetakan. <sup>[47]</sup> .....	25
<b>Gambar 2.7.</b>	Struktur butir produk cor batangan memperlihatkan kristal <i>chill</i> berbatasan dengan dinding cetakan, beberapa tumbuh menjadi butir <i>columnar</i> . <sup>[47]</sup> .....	25
<b>Gambar 2.8.</b>	Kurva pendinginan pada logam murni <sup>[44]</sup> .....	26
<b>Gambar 2.9.</b>	Kurva pendinginan pada logam paduan <sup>[44]</sup> .....	27
<b>Gambar 2.10.</b>	Skema struktur butir coran <sup>[48]</sup> .....	28
<b>Gambar 2.11.</b>	Perubahan volume pada pembekuan paduan logam. <sup>[47]</sup> .....	28
<b>Gambar 2.12.</b>	Penyusutan terjadi selama <i>sand casting</i> pada kubus (lihat penjelasan pada <i>text</i> ) <sup>[47]</sup> .....	29
<b>Gambar 2.13.</b>	Diagram pembekuan struktur dendit <sup>[47]</sup> . (a) Pertumbuhan dendrit yang mengakibatkan <i>microporosity</i> pada daerah <i>interdendritic</i> . (b) Pembekuan dendritik <i>equiaxed</i> .....	30
<b>Gambar 2.14.</b>	<i>Microporosity</i> (daerah hitam) di dalam paduan Al-9 wt. % Si <sup>[47]</sup> . .....	31
<b>Gambar 2.15.</b>	Grafik kelarutan hidrogen pada aluminium <sup>[11]</sup> .....	32
<b>Gambar 2.16.</b>	Skema proses pengerolan. (a) Ilustrasi proses <sup>[47]</sup> . (b) Ilustrasi gaya yang bekerja <sup>[52]</sup> .....	36
<b>Gambar 2.17.</b>	Struktur butir sebelum dan sesudah pengerolan dingin. (a) <i>Equiaxed</i> . (b) <i>Isotropi</i> . (c) <i>Elongated</i> <sup>[53]</sup> .....	37
<b>Gambar 2.18.</b>	Skematik representatif bagian makro dari model <i>finite element</i> untuk analisis pembentukan oksida pada proses pengerolan panas <sup>[56]</sup> .....	38
<b>Gambar 2.19.</b>	Skema struktur butir sebelum dan sesudah pengerolan panas <sup>[47]</sup> . .....	38
<b>Gambar 2.20.</b>	(a) Ilustrasi <i>alligatoring</i> yang dapat terjadi pada pengerolan dikarenakan deformasi yang tidak seragam <sup>[47]</sup> . (b) Contoh representatif cacat <i>alligatoring</i> <sup>[58]</sup> .....	40
<b>Gambar 2.21.</b>	Skema <i>overlap</i> dan <i>fishtail</i> yang umum terjadi pada proses pengerolan <sup>[58]</sup> .....	40
<b>Gambar 2.22.</b>	Skema cacat <i>wavy edge</i> pada pengerolan logam lembaran <sup>[58]</sup> .....	41
<b>Gambar 2.23.</b>	Skema cacat <i>zippering</i> pada pengerolan logam lembaran <sup>[58]</sup> .....	41

<b>Gambar 2.24.</b>	Skema perlakuan panas yang menghasilkan <i>precipitation hardening</i> . Skema ini juga menggambarkan perubahan struktur mikro yang terjadi selama proses <sup>[59]</sup> . ....	43
<b>Gambar 2.25.</b>	Diagram fasa yang mendeskripsikan prinsip pengerasan penuaan. ....	43
<b>Gambar 2.26.</b>	Diagram fasa terner Al-Zn-Mg pada <i>isothermal</i> 460 dan 200 °C yang menunjukkan fasa aluminium-rich $\alpha$ di daerah sudut <sup>[39]</sup> ...	47
<b>Gambar 2.27.</b>	Diagram fasa quartener Al-Zn-Mg-Cu pada <i>isothermal</i> 460 °C <sup>[18]</sup> . ....	48
<b>Gambar 2.28.</b>	Diagram fasa quartener Al-Zn-Mg-Cu yang menunjukkan kombinasi dari <i>solute</i> pada daerah temperatur tertentu <sup>[18]</sup> . ....	49
<b>Gambar 2.29.</b>	(a) Struktur GP zone <sup>[65]</sup> . (b) Struktur GP zone single dan multi-layer <sup>[66]</sup> . ....	50
<b>Gambar 2.30.</b>	Mekanisme pergerakan dislokasi (a) pergeseran dislokasi; (b) tekanan Orowan. ....	51
<b>Gambar 2.31.</b>	Perubahan sifat koherensi presipitat pada proses <i>aging</i> untuk paduan aluminium (a) larutan padat dengan distribusi acak dari atom terlarut (b) presipitasi koheren (c) presipitasi semi koheren (d) presipitasi inkoheren <sup>[68]</sup> . ....	51
<b>Gambar 2.32.</b>	Skematik <i>cluster</i> yang membantu pembentukan inti. <i>Cluster</i> dengan atom hitam dan putih terlihat membantu pembentukan inti secara <i>intrinsic</i> pada bagian atas presipitat, reaksi <i>extrinsic</i> ditunjukkan dengan atom berwarna biru dan <i>orange</i> <sup>[18]</sup> . ....	52
<b>Gambar 2.33.</b>	Kurva <i>age-hardening</i> dengan variasi waktu <i>ageing</i> untuk paduan Al - 5 % Zn - 2 % Mg ( <i>mass %</i> ) pada temperatur 150 °C setelah <i>direct quenching</i> (DQ), <i>water quenching</i> (WQ) dan <i>pre-ageing</i> pada temperatur ruang. <i>Micrograph</i> TEM mengindikasikan bahwa dua tahap <i>ageing</i> pada temperatur ruang menghasilkan presipitat halus (a) sedangkan DQ menghasilkan presipitat kasar (b) <sup>[6]</sup> . ....	53
<b>Gambar 2.34.</b>	Pengaruh dari Cu (kurva <i>orange</i> ) pada kekerasan Al-4Zn-3Mg (wt. %) selama <i>ageing</i> pada temperatur 150 °C <sup>[18]</sup> . ....	54
<b>Gambar 2.35.</b>	Reaksi <i>early rapid hardening</i> selama <i>ageing</i> paduan Al-Zn-Mg-Cu pada temperatur 150 °C. $\Delta$ VHN yang ditampilkan dikalkulasikan dari presipitat yang dideteksi dengan TEM <sup>[18]</sup> ...	55
<b>Gambar 2.36.</b>	<i>Micrograph</i> TEM yang menunjukkan <i>precipitate-free zone</i> (PFZ) di dalam paduan Al - 4.9 % Zn - 1.8 % Mg dan Ag yang ditambahkan (0.3 %) ( <i>mass %</i> ) setelah <i>ageing</i> pada 160 °C selama 86.4 ks. Elemen <i>microalloying</i> Ag efektif untuk pengurangan lebar PFZ <sup>[6]</sup> . ....	55
<b>Gambar 3.1.</b>	Diagram alir penelitian. ....	57
<b>Gambar 3.2.</b>	Dimensi awal <i>ingot</i> aluminium (gambar ditengah dari kiri ke kanan merupakan dimensi <i>ingot</i> setelah dilakukan pemotongan). ....	61
<b>Gambar 3.3.</b>	(a) Pemotongan <i>ingot</i> menggunakan Struers Secotom-10 dengan <i>cutting wheel silicon carbide</i> Struers 10S20 203 × 0.8 × 72 mm. (b) Dimensi <i>ingot</i> setelah pemotongan dengan <i>laser cutting</i> (atas dan bawah) dan setelah pemotongan dengan Struers Secotom-10 (tengah). ....	61

<b>Gambar 3.4.</b>	Deskripsi skematik pemotongan <i>ingot</i> aluminium sesuai dengan ketinggian <i>crucible</i> .....	61
<b>Gambar 3.5.</b>	Proses pengamplasan dengan Struers DP-U2 dan kertas SiC #220.....	62
<b>Gambar 3.6.</b>	<i>Ingot</i> seng sebelum (kiri) dan sesudah pemotongan (kanan). .....	62
<b>Gambar 3.7.</b>	<i>Ingot</i> magnesium awal (kiri) dan siap cor (kanan).....	63
<b>Gambar 3.8.</b>	Pemotongan <i>ingot</i> tembaga menjadi pelat tipis dengan menggunakan mesin potong Struers Accutom-50 ver 3.3. ....	64
<b>Gambar 3.9.</b>	Skematik kombinasi komposisi menjadi 20 paduan Al-Zn-Mg-Cu. ....	64
<b>Gambar 3.10.</b>	(a) Timbangan digital AND ER-180A. (b) Pemotongan dengan gergaji tangan. (c) <i>Filing</i> dengan kikir.....	66
<b>Gambar 3.11.</b>	<i>Ingot</i> aluminium, seng, magnesium dan tembaga siap <i>casting</i> ..	67
<b>Gambar 3.12.</b>	Rangkuman proses pengecoran paduan Al-Zn-Mg-Cu dengan Indutherm Vacuum Tilting Casting Machine VTC200. ....	68
<b>Gambar 3.13.</b>	Mesin pendingin pada rangkaian Indutherm Vacuum Tilting Casting Machine VTC200.....	69
<b>Gambar 3.14.</b>	Proses <i>preheating</i> material umpan pada temperatur 100-120 °C selama ± 15 menit. ....	69
<b>Gambar 3.15.</b>	(a) Proses <i>preheating crucible</i> . (b) Proses <i>preheating</i> cetakan..	71
<b>Gambar 3.16.</b>	Alat pelindung diri (a) Sarung tangan <i>welder</i> . (b) <i>Full face shield</i> . (c) Contoh penggunaan alat pelindung diri. ....	71
<b>Gambar 3.17.</b>	(a) Pemasangan <i>crucible</i> pada <i>crucible chamber</i> (tanda panah merah menunjukkan <i>heating coil</i> ). (b) Pemasangan <i>thermocouple</i> pada <i>crucible</i> . (c) Susunan <i>ingot</i> dan <i>thermocouple</i> pada <i>crucible</i> .....	71
<b>Gambar 3.18.</b>	(a) <i>Groove</i> pada <i>mold chamber</i> . (b) Pemasangan cetakan yang sesuai. ....	73
<b>Gambar 3.19.</b>	<i>Crucible</i> dan <i>mold chamber</i> harus dipastikan terkunci dengan baik (ditunjukkan dengan tanda panah). ....	73
<b>Gambar 3.20.</b>	(a) Saklar utama arus listrik. (b) Saklar arus pada mesin. (c) Tampilan mesin <i>on</i> .....	74
<b>Gambar 3.21.</b>	(a) Mesin pendingin. (b) Pompa vakum. (c) <i>Crucible chamber</i> . (d) <i>Mold chamber</i> . Kesatuan (c) dan (d) disebut <i>inductor housing</i> .(e) Tabung gas argon. ....	74
<b>Gambar 3.22.</b>	(a) Tampilan parameter mesin. (b) Tombol pengaturan mesin..	76
<b>Gambar 3.23.</b>	Grafik perubahan temperatur selama proses pengecoran.....	77
<b>Gambar 3.24.</b>	Jendela untuk mengamati proses peleburan, terlihat pelat emas yang dapat digunakan untuk mengurangi radiasi cahaya.....	77
<b>Gambar 3.25.</b>	Tampilan $T_{\text{setting}}$ dan $T_{\text{aktual}}$ pada mesin.....	78
<b>Gambar 3.26.</b>	<i>Inductor housing</i> mengalami <i>tilting</i> 90° ke arah vertikal untuk proses <i>pouring</i> . ....	79
<b>Gambar 3.27.</b>	<i>Residue</i> yang biasanya melekat pada <i>crucible</i> dan <i>thermocouple shield</i> . ....	80
<b>Gambar 3.28.</b>	Penandaan kode sampel pada <i>billet</i> . (a) <i>Stamping punch</i> . (b) Proses penandaan dengan menggunakan <i>stamping punch</i> .....	81

<b>Gambar 3.29.</b>	Berturut-turut dari kiri ke kanan adalah <i>residue</i> , kupon parameter proses, dan <i>billet</i> paduan Al-Zn-Mg-Cu akan dimasukkan ke dalam satu kantong plastik dan diberi label. ....	81
<b>Gambar 3.30.</b>	(a) Peletakkan sampel pada <i>muffle furnace</i> harus diperhatikan agar tidak menyentuh <i>heating coil</i> di dalam mesin. (b) Proses <i>quenching</i> setelah homogenisasi. ....	82
<b>Gambar 3.31.</b>	(a) Kondisi pintu <i>muffle furnace</i> tertutup. (b) Panel kontrol mesin. ....	83
<b>Gambar 3.32.</b>	(a) <i>Billet</i> sebelum (kiri) dan sesudah <i>grinding</i> (kanan). (b) <i>Billet</i> setelah <i>polishing</i> . (c) Mikroskop optik Olympus TH 4-200. ....	83
<b>Gambar 3.33.</b>	(a) <i>Driller bit 7/64 "</i> Blue Bullet High Steel Jobber. (b) Proses pembersihan <i>driller bit</i> dengan <i>steam</i> udara. (c) Proses pembersihan <i>driller bit</i> dengan Bransonic <i>degassing machine</i> 2510. ....	84
<b>Gambar 3.34.</b>	Pengambilan sampel uji komposisi kimia berdasarkan standar ASTM E 88 - 91. ....	85
<b>Gambar 3.35.</b>	(a) Mesin bor <i>Waldown D-10 type 8 SN Series III</i> kapasitas $\frac{1}{2}$ " IN <i>steel</i> . (b) Proses pengeboran sampel untuk pengambilan sampel uji komposisi kimia. ....	85
<b>Gambar 3.36.</b>	(a) (b) (c) dan (d) berturut-turut adalah <i>billet</i> sebelum dan setelah pengeboran serta proses penyimpanan dan pelabelan <i>swarf</i> . ....	86
<b>Gambar 3.37.</b>	(a) Mesin potong Struers Secotom-10 (yang sedang beroperasi). (b) Tampilan parameter proses pada mesin yang perlu diperhatikan. ....	86
<b>Gambar 3.38.</b>	(a) Alat rol manual merk Cavallin, bagian yang diperbesar menunjukkan skala pengaturan celah rol pada roda gigi pemutar. (b) Pengaturan celah rol. ....	89
<b>Gambar 3.39.</b>	Perubahan dimensi dan deformasi dari <i>billet</i> sampai menjadi pelat. ....	90
<b>Gambar 3.40.</b>	Pelat hasil pengerolan dipotong menjadi spesimen <i>heat treatment</i> dengan dimensi $\pm 6 \times 20$ mm. ....	90
<b>Gambar 3.41.</b>	(a) <i>Salth bath</i> Jetlow Furnace. (b) Permakaian alat pelindung diri pada saat bekerja di area <i>salth bath</i> . (c) Wadah keranjang dari kawat baja untuk penempatan sampel pada <i>salth bath</i> . ....	91
<b>Gambar 3.42.</b>	(a) Nitrogen cair. (b) <i>Dry ice</i> . ....	92
<b>Gambar 3.43.</b>	Wadah keranjang dari aluminium <i>screen wire</i> untuk peletakkan sampel pada <i>oil bath</i> . ....	92
<b>Gambar 3.44.</b>	(a) <i>Oil bath</i> (tampak depan). (b) <i>Oil bath</i> (tampak atas). (c) Susunan letak <i>oil bath</i> dan <i>salth bath</i> di dalam laboratorium <i>heat treatment</i> ACMM The University of Sydney. ....	93
<b>Gambar 3.45.</b>	Proses <i>quenching</i> dari <i>oil bath</i> . ....	94
<b>Gambar 3.46.</b>	Skematik pengujian kekerasan <i>vickers</i> <sup>[70]</sup> . ....	95
<b>Gambar 3.47.</b>	Persiapan sampel <i>pre-ageing</i> sebelum pengujian kekerasan. (a) Pembersihan dengan etanol. (b) Pengamplasan dengan kertas amplas #2000. ....	96

- Gambar 3.48.** (a) LECO Vickers Hardness Tester LV700<sub>AT</sub>. (b) Tombol *read* untuk membaca panjang jejak *diamond*, pada bagian ujung dapat diputar (*open* atau *close*) untuk menentukan persinggungan sudut jejak dengan garis skala pengukur pada mikroskop. (c) Pengaturan fokus sampel. (d) Pengaturan beban mesin. (e) Tampilan hasil dan *touch screen* untuk memulai penjejakan. .... 97
- Gambar 3.49.** *Freezer* Forma-86C sebagai tempat penyimpanan sampel. .... 98
- Gambar 3.50.** (a) Penyimpanan sampel di dalam plastik berbeda dan diberi label. (b) dan (c) Penggabungan di dalam wadah yang lebih besar agar tidak tercecer. .... 98
- Gambar 3.51.** Mikroskop optik di Departemen Metalurgi dan Material FTUI. 99
- Gambar 3.52.** (a) Deskripsi skematis pembagian sampel *heat treatment* untuk spesimen SEM. (b) Proses pemotongan dengan menggunakan Struers Accutom-50 ver 3.3. .... 100
- Gambar 3.53.** (a) Mesin Struers CitoPress-10. (b) Resin akrilik ClaroFast (untuk *transparent mounting*). .... 101
- Gambar 3.54.** Mesin *grinding* Struers RotoPol-22, disebelah kiri adalah tampak depan mesin (sedang *off*) dan disebelah kanan adalah tampak samping mesin (sedang beroperasi). .... 102
- Gambar 3.55.** (a) Mesin poles Struers TegraPol-25 tampak depan (foto sebelah kiri) dan tampak samping (foto sebelah kanan). (b) Media poles. (c) Media poles dan cairan poles (alumina). .... 103
- Gambar 3.56.** (a) Dari kiri ke kanan: sampel setelah *mounting*, *grinding* dan *polishing*; *carbon coating*; *silver coating* (dan tampak samping proses *coating*). (b) *Carbon coating* di bawah pengamatan SEM. .... 104
- Gambar 3.57.** SEM Carl Zeiss AG - EVO<sup>®</sup> 50 Series (dilengkapi 4 detektor EDS), bagian yang diperbesar merupakan tampilan dari CCD kamera pada area sampel, terlihat di bagian tengah dudukan sampel dan tepat di atasnya adalah *electron gun*, bagian yang ditunjuk dengan tanda panah merah adalah *X-ray detector*. .... 105
- Gambar 3.58.** *High Resolution-SEM* Zeiss ULTRA plus Gemini bagian yang diperbesar adalah detektor Bruker XFlash 4010 EDS. .... 105
- Gambar 3.59.** SEM LEO 420i di Departemen Metalurgi dan Material FTUI. 106
- Gambar 3.60.** *Desicator* untuk tempat penyimpanan dudukan spesimen SEM, bagian yang ditunjuk dengan tanda panah adalah dudukan yang sering digunakan. .... 106
- Gambar 3.61.** (a) Dimensi awal sampel *heat treatment*. (b) Sampel dipotong melintang untuk mendapatkan spesimen yang lebih tipis. .... 107
- Gambar 3.62.** (a) Penempelan sampel pada balok logam dengan Loctite 460 *instant adhesive*. (b) Proses pemotongan melintang dengan *aluminium oxide cut off wheel* 50A13 pada mesin potong Struers Accutom-50 ver 3.3. .... 108
- Gambar 3.63.** Gatan *mechanical puncher* tanda panah menunjukkan tempat peletakkan lembaran sampel. .... 108
- Gambar 3.64.** (a) Prinsip dasar kinerja *jet electropolishing*<sup>[72]</sup>. (b) Kurva *electropolishing*<sup>[72]</sup>. .... 109
- Gambar 3.65.** Prinsip kerja sensor cahaya pada mesin *electropolishing*. .... 109

<b>Gambar 3.66.</b>	(a) Electropolishing Jet Thinner Struers Tenupol-5. (b) bak <i>electropolishing</i> . (c) <i>cooler machine</i> Lauda ProLine 855. Di tengah adalah kesatuan rangkaian mesin <i>electropolishing</i> . ....	110
<b>Gambar 3.67.</b>	(a) <i>Sample holder</i> . (b) Letak <i>sample holder</i> pada bak <i>electropolishing</i> .....	111
<b>Gambar 3.68.</b>	<i>Tweezer</i> atau pinset Inox no. 5 tampak atas (foto sebelah kiri) dan tampak samping (foto sebelah kanan).....	112
<b>Gambar 3.69.</b>	Tampilan mesin setelah proses <i>electropolishing</i> selesai. ....	112
<b>Gambar 3.70.</b>	Deskripsi skematik penipisan spesimen TEM, sampel yang baik memiliki satu buah lubang kecil di tengah.....	113
<b>Gambar 3.71.</b>	Foto mikro spesimen TEM paduan Al-1.7Zn-1.7Mg-1Cu (at. %) setelah <i>electropolishing</i> pada beberapa parameter proses yang berbeda. ....	114
<b>Gambar 3.72.</b>	Deskripsi skematis sederhana dari <i>transmission electron microscope</i> (TEM). ....	115
<b>Gambar 3.73.</b>	(a) <i>Transmission electron microscope</i> (TEM) Philips CM12 (120 kV). (b) <i>Single tilt sample holder</i> .....	115
<b>Gambar 4.1.</b>	<i>Undissolved</i> tembaga yang terjadi karena <i>holding time</i> yang terlalu singkat pada proses pengecoran.....	119
<b>Gambar 4.2.</b>	Tekanan uap untuk beberapa logam (garis <i>solid</i> menunjukkan data untuk logam cair dan garis putus-putus untuk logam padat) <sup>[12]</sup> . ....	122
<b>Gambar 4.3.</b>	Bagian <i>shrinkage</i> akan dipotong dan menjadi <i>scrap</i> produk... 125	
<b>Gambar 4.4.</b>	Struktur mikro <i>as cast</i> paduan Al-1.7Zn-1.7Mg-0.4Cu, Al-1.7Zn-1.7Mg-1.0Cu dan Al-1.7Zn-1.7Mg-1.6Cu (at. %) pada perbesaran 5X dan 10X tanpa etsa. ....	126
<b>Gambar 4.5.</b>	Kurva DSC paduan <i>as cast</i> AA7075 (diuji pada spesimen dengan diameter 500 mm) <sup>[74]</sup> . ....	128
<b>Gambar 4.6.</b>	Oksida pada permukaan <i>billet</i> yang terbentuk karena pengerolan panas.....	130
<b>Gambar 4.7.</b>	Struktur mikro <i>as rolled</i> paduan Al-2.9Zn-2.9Mg-0.7Cu (at. %) pada perbesaran 100x dengan menggunakan zat etsa Keller's <i>reagent</i> .....	131
<b>Gambar 4.8.</b>	Cacat pengerolan <i>alligating</i> yang terjadi pada paduan Al-1.7Zn-1.7Mg-1.6Cu (at. %). Selain disebabkan oleh deformasi yang tidak seragam, <i>alligating</i> pada penelitian ini juga diakibatkan oleh peningkatan kadar Cu dalam paduan (mencapai 1.6 at. %). ....	135
<b>Gambar 4.9.</b>	Cacat pengerolan <i>overlap</i> dan <i>fishtail</i> pada pengerolan paduan Al-Zn-Mg-Cu. Untuk membedakan kedua cacat ini, korelasikan Gambar 4.9 dengan Gambar 2.21. ....	136
<b>Gambar 4.10.</b>	Cacat pengerolan <i>wrinkling</i> dan <i>hairline crack</i> pada pengerolan paduan Al-Zn-Mg-Cu. Cacat ini terjadi pada <i>trial</i> pengerolan yang dilakukan dari ½ ketebalan <i>billet</i> . ....	136
<b>Gambar 4.11.</b>	Cacat <i>wavy edge</i> pada pengerolan paduan Al-Zn-Mg-Cu (a) Tampak depan. (b) Tampak samping. Cacat ini dapat dilihat dengan jelas pada sampel <i>trial</i> pengerolan dari ½ ketebalan <i>billet</i> . ....	137

<b>Gambar 4.12.</b>	(a) Retak pelat pada bagian ujung, yang pada umumnya di dalamnya terdapat cacat <i>alligatoring</i> sehingga keseluruhan bagian tidak dapat digunakan sebagai sampel <i>heat treatment</i> . (b) Retak pelat pada bagian samping, bagian yang retak dibuang, dan daerah sekitar <i>crack</i> yang permukaannya masih rata dapat digunakan untuk sampel <i>heat treatment</i> . Kedua jenis retak seperti ini ditemukan pada sampel dengan kadar Zn dan Cu yang tinggi .....	138
<b>Gambar 5.1.</b>	Respons pengerasan pada paduan (a) Al - x Zn - x Mg - 0.4 Cu, (b) Al - x Zn - x Mg - 0.7 Cu, (c) Al - x Zn - x Mg - 1.0 Cu, (d) Al - x Zn - x Mg - 1.3 Cu dan (e) Al - x Zn - x Mg - 1.6 Cu (at. %) selama <i>ageing</i> pada temperatur 120 °C. ....	141
<b>Gambar 5.2.</b>	Kurva 3 dimensi dari pengaruh Zn dan Mg terhadap kekerasan puncak paduan Al-Zn-Mg-Cu setelah <i>ageing</i> selama 24 jam pada temperatur 120 °C. ....	142
<b>Gambar 5.3.</b>	Mikrostruktur paduan Al-1.7Zn-1.7Mg-0.4Cu (at. %) selama (a) 1 menit (b) 24 jam (c) 1 minggu <i>ageing</i> pada temperatur 120 °C dengan perbesaran 100X menggunakan etsa Keller's reagent. ....	143
<b>Gambar 5.4.</b>	Contoh penggunaan lingkaran standar ASTM E 112 – 96 untuk penentuan besar butir. Sampel di bawah lingkaran merupakan paduan Al-1.7Zn-1.7Mg-0.4Cu (at.%) setelah <i>ageing</i> selama 24 jam (tanpa garis presipitat di dalam butir) dengan perbesaran 100X menggunakan etsa Keller's reagent. ....	145
<b>Gambar 5.5.</b>	Ukuran butir standar ASTM <sup>[76]</sup> . ....	146
<b>Gambar 5.6.</b>	Foto <i>Back Scattered Electron</i> (BSE) paduan Al-1.7Zn-1.7Mg-0.4Cu (at. %) selama <i>ageing</i> pada temperatur 120 °C pada kondisi (a) dan (c) <i>under aged</i> (b) dan (d) <i>over aged</i> . ....	148
<b>Gambar 5.7.</b>	Foto (a) <i>Secondary Electron</i> (SE) dan (b) <i>X-Ray Mapping</i> paduan Al-1.7Zn-1.7Mg-0.4Cu (at. %) pada pengamatan dengan <i>High Resolution</i> SEM selama 1 minggu <i>ageing</i> pada temperatur 120 °C dengan perbesaran 104105 X. ....	150
<b>Gambar 5.8.</b>	Foto menggunakan sinyal AsB dengan inlens pada pengamatan dengan <i>High Resolution</i> SEM dari paduan Al-1.7Zn-1.7Mg-0.4Cu (at. %) selama 1 minggu <i>ageing</i> pada temperatur 120 °C dengan perbesaran 350000 X. ....	151
<b>Gambar 5.9.</b>	<i>Bright field transmission electron micrograph</i> paduan Al-1.7Zn-1.7Mg-0.4Cu (at. %) selama (a), (b) 1 menit (c) 24 jam <i>ageing</i> pada temperatur 120 °C dengan arah standar $\langle 110 \rangle_{\alpha}$ . ....	152
<b>Gambar 5.10.</b>	Foto <i>Back Scattered Electron</i> (BSE) paduan (a) Al-1.7Zn-1.7Mg-0.7Cu (b) Al-2.9Zn-2.9Mg-0.7Cu (at. %) selama 1 minggu <i>ageing</i> pada temperatur 120 °C. ....	154
<b>Gambar 5.11.</b>	Pemetaan <i>X-Ray</i> paduan (a) Al-1.7Zn-1.7Mg-0.7Cu (b) Al-2.9Zn-2.9Mg-0.7Cu (at. %) selama 1 minggu <i>ageing</i> pada temperatur 120 °C. ....	155
<b>Gambar 5.12.</b>	Susunan skematik arah sampel pada SEM untuk teknik EBSD <sup>[77]</sup> . ....	157
<b>Gambar 5.13.</b>	Interaksi elektron dengan material kristalin <sup>[77]</sup> . ....	157



<b>Gambar 5.14.</b>	Kikuchi <i>band</i> pada paduan Al-2.9Zn-2.9Mg-0.7Cu (at. %) selama 1 minggu <i>ageing</i> pada temperatur 120 °C. Kikuchi <i>band</i> merupakan bentuk interaksi elektron dengan kristal logam yang menjadi dasar pembentukan pola difraksi BSE. ....	159
<b>Gambar 5.15.</b>	Distribusi bentuk dan ukuran butir paduan Al-2.9Zn-2.9Mg-0.7Cu (at. %) selama 1 minggu <i>ageing</i> pada temperatur 120 °C. ....	160
<b>Gambar 5.16.</b>	Kontur gambaran kutub paduan Al-2.9Zn-2.9Mg-0.7Cu (at. %) selama 1 minggu <i>ageing</i> pada temperatur 120 °C, menunjukkan arah <100> dan <111> paralel dengan tekstur permukaan normal memiliki densitas yang tinggi (lihat gambaran densitas melalui perbedaan warna). ....	160
<b>Gambar 6.1.</b>	Respons 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 .....	162
<b>Gambar 6.2.</b>	Kurva <i>scatter</i> dari sajian data 3 dimensi pada Tabel 5.1 yang merepresentasikan kekerasan puncak paduan Al-Zn-Mg-Cu setelah <i>ageing</i> selama 24 jam pada temperatur 120 °C.....	163
<b>Gambar 6.3.</b>	<i>Square grid</i> standar pada ASTM E 562 - 02 <sup>[78]</sup> .....	164
<b>Gambar 6.4.</b>	Foto <i>Back Scattered Electron</i> (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 <i>ageing</i> pada temperatur 120 °C dengan perbesaran 1000X.....	165
<b>Gambar 6.5.</b>	Foto <i>Back Scattered Electron</i> (BSE) paduan Al-1.7Zn-1.7Mg-1.6Cu (at. %) selama 1 minggu <i>ageing</i> pada temperatur 120 °C dengan perbesaran 2000X.....	166
<b>Gambar 7.1.</b>	Respons pengerasan pada paduan Al-1.7Zn-1.7Mg- (0.4 dan 0.7) Cu serta paduan Al-2.9Zn-2.9Mg- (0.4 dan 0.7) Cu (at. %) selama <i>ageing</i> pada temperatur 190 °C.....	168
<b>Gambar 7.2.</b>	Kurva 3 dimensi dari pengaruh Zn dan Mg terhadap respons <i>rapid hardening</i> paduan Al-1.7Zn-1.7Mg- (0.4 dan 0.7) Cu serta paduan Al-2.9Zn-2.9Mg- (0.4 dan 0.7) Cu (at. %) selama <i>ageing</i> pada temperatur 190 °C.....	169
<b>Gambar 7.3.</b>	Kurva <i>scatter</i> untuk melihat pengaruh Cu terhadap respons <i>rapid hardening</i> paduan Al-1.7Zn-1.7Mg- (0.4 dan 0.7) Cu serta paduan Al-2.9Zn-2.9Mg- (0.4 dan 0.7) Cu (at. %) selama <i>ageing</i> pada temperatur 190 °C.....	170
<b>Gambar 7.4.</b>	<i>Bright field transmission electron micrograph selected area diffraction</i> paduan Al-1.7Zn-1.7Mg-0.4Cu (at. %) selama <i>ageing</i> pada temperatur 190 °C.....	171
<b>Gambar 7.5.</b>	Foto <i>Back Scattered Electron</i> (BSE) paduan Al-1.7Zn-1.7Mg-0.4Cu (at. %) selama <i>ageing</i> (a) 1 minggu pada temperatur 120 °C, (b) 3 hari pada temperatur 190 °C yang menunjukkan adanya PFZ pada batas butir. Foto diambil pada perbesaran 60000X.	173

## DAFTAR TABEL

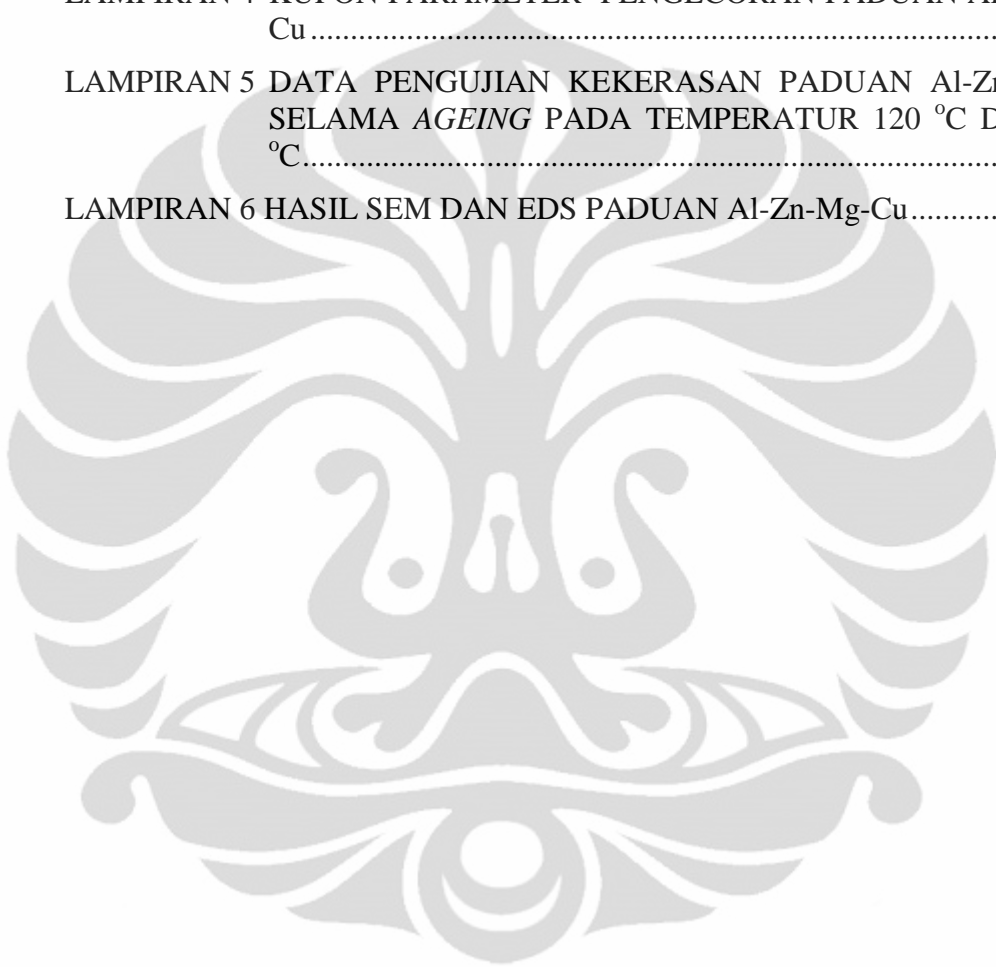
<b>Tabel 2.1.</b>	Kelarutan maksimum dari unsur-unsur paduan utama pada aluminium <sup>[4]</sup> .....	12
<b>Tabel 2.2.</b>	Klasifikasi aluminium paduan cor ( <i>casting alloys</i> ) <sup>[37]</sup> .....	16
<b>Tabel 2.3.</b>	Klasifikasi aluminium tempa ( <i>wrought alloys</i> ) <sup>[37, 38]</sup> .....	17
<b>Tabel 2.4.</b>	Batas komposisi untuk paduan komersil aluminium-seng-magnesium <sup>[39]</sup> .....	18
<b>Tabel 2.5.</b>	Beberapa paduan aluminium seri 7xxx yang komersil di pasaran <sup>[40]</sup> .....	18
<b>Tabel 2.6.</b>	Komposisi kimia dan komposisi fasa dari paduan cor aluminium (tanpa pengotor) <sup>[3]</sup> .....	21
<b>Tabel 2.7.</b>	Fasa yang mungkin muncul pada dalam paduan Al-Zn-Mg <sup>[39]</sup> ....	21
<b>Tabel 2.8.</b>	Penyusutan pembekuan dan penyusutan padat untuk logam cor, <sup>[47]</sup> .....	29
<b>Tabel 2.9.</b>	Prosedur pengerolan panas pelat aluminium 7075 dengan tebal 10 mm <sup>[57]</sup> .....	39
<b>Tabel 2.10.</b>	Sembilan hubungan orientasi berbeda dan morfologi dari kesetimbangan fasa $\eta$ <sup>[18]</sup> .....	48
<b>Tabel 2.11.</b>	Morfologi dan kristalografi GP zone di dalam matriks pada paduan aluminium <i>age-hardenable</i> <sup>[6]</sup> .....	50
<b>Tabel 3.1.</b>	Sertifikat analisis komposisi <i>ingot</i> aluminium (wt.%).....	60
<b>Tabel 3.2.</b>	Neraca massa awal 20 paduan Al-Zn-Mg-Cu.....	65
<b>Tabel 3.3.</b>	Data yang digunakan dalam perhitungan neraca massa.....	66
<b>Tabel 3.4.</b>	Perbedaan parameter pemotongan <i>ingot</i> aluminium dan paduan Al-Zn-Mg-Cu.....	88
<b>Tabel 4.1.</b>	Parameter proses dan persentase elemen yang hilang pada pengecoran 20 paduan Al-Zn-Mg-Cu.....	117
<b>Tabel 4.2.</b>	Perbandingan data perhitungan komposisi paduan awal ( <i>initial</i> ) dengan nilai yang didapatkan dari pengujian komposisi kimia (ICP).....	118
<b>Tabel 4.3.</b>	Rangkuman proses dan hasil pengerolan 20 paduan Al-Zn-Mg-Cu.....	133
<b>Tabel 5.1.</b>	Nilai kekerasan puncak (HV) dua puluh paduan Al-Zn-Mg-Cu setelah proses <i>ageing</i> selama 24 jam pada temperatur 120 °C. Komposisi Zn (= Mg) dan Cu disajikan dalam at. %.....	140
<b>Tabel 5.2.</b>	Perhitungan ukuran butir paduan Al-1.7Zn-1.7Mg-0.4Cu (at.%) selama 1 menit, 24 jam dan 1 minggu <i>ageing</i> pada temperatur 120 °C.....	146
<b>Tabel 5.3.</b>	Rangkuman hasil EDS paduan Al-1.7Zn-1.7Mg-0.4Cu (at. %) 1 menit <i>ageing</i> pada temperatur 120 °C berdasarkan foto BSE.....	148
<b>Tabel 5.4.</b>	Rangkuman hasil EDS paduan Al-1.7Zn-1.7Mg-0.4Cu (at. %) 1 minggu <i>ageing</i> pada temperatur 120 °C berdasarkan foto BSE..	148
<b>Tabel 5.5.</b>	Rangkuman hasil EDS paduan Al-1.7Zn-1.7Mg-0.7Cu (at. %) 1 menit <i>ageing</i> pada temperatur 120 °C berdasarkan foto BSE.....	154
<b>Tabel 5.6.</b>	Rangkuman hasil EDS paduan Al-2.9Zn-2.9Mg-0.7Cu (at. %) 1 minggu <i>ageing</i> pada temperatur 120 °C berdasarkan foto BSE..	154

- Tabel 6.1.** Rangkuman hasil EDS paduan Al-1.7Zn-1.7Mg-1.6Cu (at. %) 1 menit *ageing* pada temperatur 120 °C berdasarkan foto BSE..... 166
- Tabel 6.2.** 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..... 167
- Tabel 7.1.** Selisih nilai kekerasan setelah proses *ageing* selama 1 menit pada temperatur 190 °C dengan nilai kekerasan *as quench* ( $\Delta H$ ) untuk paduan Al-1.7Zn-1.7Mg- (0.4 dan 0.7) Cu serta paduan Al-2.9Zn-2.9Mg- (0.4 dan 0.7) Cu (at. %). Komposisi Zn (= Mg) dan Cu disajikan dalam at. %. ..... 169




## DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN 1 SERTIFIKAT <i>INGOT</i> ALUMINIUM.....	181
LAMPIRAN 2 HASIL PENGUJIAN KOMPOSISI KIMIA (ICP) .....	182
LAMPIRAN 3 DATA PROSES PENGECORAN PADUAN Al-Zn-Mg-Cu ..	184
LAMPIRAN 4 KUPON PARAMETER PENGECORAN PADUAN Al-Zn-Mg-Cu .....	207
LAMPIRAN 5 DATA PENGUJIAN KEKERASAN PADUAN Al-Zn-Mg-Cu SELAMA <i>AGEING</i> PADA TEMPERATUR 120 °C DAN 190 °C.....	215
LAMPIRAN 6 HASIL SEM DAN EDS PADUAN Al-Zn-Mg-Cu.....	239



## DAFTAR SINGKATAN



<b>AA</b>	<b>Aluminum Association</b>
<b>ASM</b>	<b>American Society for Material</b>
<b>ASTM</b>	<b>American Standard for Testing and Material</b>
<b>BSE</b>	<b>Back Scattered Electron</b>
<b>EDS</b>	<b>Energy Dispersive Spectroscopy</b>
<b>GPZs</b>	<b>Guinier-Preston Zones</b>
<b>HRSEM</b>	<b>High Resolution Scanning Electron Microscope</b>
<b>HV</b>	<b>Hardness Vickers</b>
<b>JIS</b>	<b>Japan Industrial Standard</b>
<b>PFZ</b>	<b>Precipitate Free Zone</b>
<b>RH</b>	<b>Rapid Hardening</b>
<b>SE</b>	<b>Secondary Electron</b>
<b>SEM</b>	<b>Scanning Electron Microscope</b>
<b>TEM</b>	<b>Transmission Electron Microscope</b>

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang Penelitian

Aluminium merupakan unsur ketiga terbanyak dalam kerak bumi (setelah oksigen dan silikon), yang jumlahnya mencapai 8.2 % massa total. Sebagai logam, aluminium merupakan unsur terbanyak dalam aplikasi industri yang diikuti dengan besi (5.6 %) dan magnesium (2.3 %)<sup>[1]</sup>. Karena jumlahnya yang melimpah di alam dan sifatnya yang menguntungkan, penggunaan aluminium terus berkembang, baik dalam aplikasi industri umum maupun pengembangan paduan mutakhir.

Aluminium memiliki berat jenis hampir sepertiga dari logam baja, beberapa paduannya juga memiliki rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi sehingga cocok dengan kebutuhan efisiensi transportasi, baik di darat maupun di udara. Selain itu titik lebur yang relatif rendah yaitu sekitar 660 °C, ketahanan korosi yang baik serta mudah dipadu dengan unsur lain untuk meningkatkan sifat fisik dan mekanis juga menjadi keunggulan aluminium dalam aplikasinya.

Paduan aluminium-seng-magnesium-tembaga memiliki aplikasi penting dalam industri penerbangan. Dalam aeronautika, 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<sup>[2]</sup>.

Seng, Mg, Cu merupakan tiga dari empat elemen kimia utama pada aluminium, karena kelarutan mereka yang besar dan pengaruhnya yang signifikan dalam penentuan sifat dan karakteristik paduan<sup>[3]</sup>. Kelarutan maksimum Zn, Mg dan Cu dalam aluminium adalah 66.4, 16.26, dan 2.48 (at. %), dimana dengan keadaan ini dapat dipastikan terdapat lebih dari satu mekanisme penguatan dalam paduan Al-Zn-Mg-Cu<sup>[4]</sup>.

Seng (Zn) ditambahkan dalam aluminium karena responsnya yang sangat baik dalam *age hardening*. Unsur ini memberikan pengaruh yang signifikan pada presipitasi aluminium, terutama bila dipadukan dengan Mg dan Cu. *Ultra fine grain* (UFG) paduan Al-Zn-Mg-Cu, dari proses *equal-channel angular pressing* (ECAP) pada temperatur 200 °C oleh Gang Sha, *et al.*<sup>[5]</sup> memperlihatkan bahwa, berbeda dengan segregasi Mg dan Cu, elemen Zn tidak selalu menunjukkan segregasi yang jelas dan bahkan menunjukkan penipisan di batas butir. Peningkatan kekuatan dan *ductility* pada dasarnya dipengaruhi oleh pengurangan area *precipitat free zone* di dekat batas butir<sup>[6]</sup>.

Tembaga (Cu) dalam paduan Al-Zn-Mg juga dapat meningkatkan kekuatan, namun umumnya ditambahkan untuk mengurangi *hot shortness*, meningkatkan *castability*, dan sebagai *corrosion resistance*. Hadjadj & Amira<sup>[7]</sup> 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)<sup>[8]</sup>. 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<sup>[9]</sup>. Mereka juga mengobservasi bahwa penambahan Cu merubah densitas dari Guinier-Preston-zones (GPZs) dan bentuk serta komposisi partikel. Pada paduan Al-Zn-Mg GPZs berbentuk *spherical*, sedangkan paduan yang sama dengan kandungan Cu 0.5 at. % ditemukan bentuk *spherical* dan *ellipsoidal* GPZs. 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 Al<sub>2</sub>CuMg terbentuk selama perlakuan panas<sup>[10]</sup>.

Dari perbedaan pengaruh tiap elemen utama dalam paduan Al-Zn-Mg-Cu di atas, perlu ditentukan komposisi yang optimum untuk menghasilkan paduan dengan karakteristik terbaik. Pengaruh elemen terhadap pengerasan paduan dapat diungkap setelah dilakukan 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.

Kemampucoran paduan Al-Zn-Mg tidak begitu baik, sehingga diperlukan teknik pengecoran yang sesuai untuk meminimalisir cacat penyusutan dan retak panas<sup>[11]</sup>. Titik lebur Cu cukup tinggi yaitu sekitar 1083 °C<sup>[12]</sup>. Nilai ini jauh lebih tinggi dibandingkan dengan titik lebur logam Zn (419.5 °C) bahkan masih diatas titik uap Zn yaitu sebesar 907 °C. Hal ini memberikan efek bahwa tidak dimungkinkan untuk melebur logam tembaga dalam membuat paduan Al-Zn-Mg-Cu dari logam murninya. Sehingga mekanisme pelarutan tembaga dalam pembuatan paduan ini adalah dengan cara difusi logam. Unit dapur induksi vakum baru di University of Sydney digunakan untuk mempersiapkan semua paduan. Proses peleburan akan berlangsung lebih cepat dengan teknik induksi dimana koil (yang mengelilingi *crucible*) berfungsi sebagai kumparan primer yang dialiri arus AC dan material umpan sebagai kumparan sekunder. Arus induksi terjadi dari kumparan primer ke arah kumparan sekunder merupakan energi panas yang sanggup untuk mencairkannya dalam waktu singkat. Lingkungan vakum sangat baik bagi peleburan logam untuk meminimalisir adanya gas hidrogen yang dapat menyebabkan porositas pada produk cor<sup>[13]</sup>.

Al-Zn-Mg-Cu merupakan sistem paduan yang kompleks. Xie Fanyou, *et al.*<sup>[14]</sup> melaporkan bahwa terdapat beberapa fasa intermetalik yang dapat terjadi selama pembekuan, seperti  $\eta(\text{MgZn}_2)$ ,  $T(\text{Al}_2\text{Mg}_3\text{Zn}_3)$ ,  $S(\text{Al}_2\text{CuMg})$ ,  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$ ,  $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ ,  $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$  dan  $\text{Mg}_2\text{Si}$ , dimana jumlah fasa  $\eta$  dan  $T$  dalam larutan padat hadir dengan komposisi dari empat elemen yang cukup bervariasi. Penelitian oleh Xi-gang, *et al.*<sup>[15]</sup> memperlihatkan bahwa pada saat solidifikasi terbentuk mikrostruktur yang meliputi  $\alpha(\text{Al})$ , eutektik ( $\alpha(\text{Al}) + \text{Mg}(\text{Al,Cu,Zn})_2$ ) dan  $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ . Untuk melarutkan eutektik dan mengurangi mikrosegregasi perlu dilakukan homogenisasi pada produk cor sebelum dilakukan proses selanjutnya. Setelah homogenisasi terjadi pelarutan  $\text{Mg}(\text{Al,Cu,Zn})_2$ , kemudian terbentuk fasa baru  $\text{Al}_2\text{CuMg}$ , sedangkan  $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$  cenderung tetap selama perlakuan panas pada temperatur 460 °C. Dalam penelitian ini, homogenisasi dilakukan pada



temperatur 500 °C selama 24 jam kemudian dicelup air sebelum dilakukan tahapan selanjutnya.

Untuk meningkatkan kekerasan dan sifat material, sebelum perlakuan panas terlebih dahulu dilakukan proses pengerolan. Perlakuan penuaan artifisial pada paduan Al-Zn-Mg-Cu biasa dilakukan untuk mempercepat proses pengerasan. Peningkatan kekerasan puncak (*peak hardness*) dapat dilakukan dengan beberapa cara salah satunya dengan perlakuan penuaan ganda (*double ageing treatment*). Salamci, Elmas<sup>[16]</sup> memperlihatkan bahwa perlakuan penuaan ganda pada Al 7075 (5 jam pada 105 °C + 1 jam pada 175 °C) menunjukkan nilai kekerasan puncak yang lebih tinggi dibandingkan dengan penuaan tunggal (2 jam pada 175 °C). Hal ini disebabkan oleh terbentuknya presipitat yang lebih halus dan juga densitas yang lebih tinggi, sehingga jarak interpresipitat menjadi lebih kecil dimana dibutuhkan energi yang lebih tinggi untuk dislokasi *bowing*.

Perlakuan panas yang dilakukan pada penelitian ini, selain dilakukan untuk mengungkap pengaruh tiap elemen terhadap karakteristik kekerasan paduan, juga bertujuan untuk melihat adanya fenomena *rapid hardening*. *Rapid hardening* merupakan fenomena pengerasan paduan aluminium pada saat-saat awal perlakuan panas. Fenomena ini dipercaya karena adanya *clustering* dari unsur terlarut dalam aluminium. Penelitian Gang Sha dan Alfred Cerezo mengenai presipitasi tahap awal pada paduan Al-Zn-Mg-Cu (7050)<sup>[17]</sup> menunjukkan bahwa, segera setelah pencelupan terjadi pembentukan *cluster* sebagai nukleasi homogen dari *super-saturated-solid-solution* (SSSS). Setelah *ageing* (dalam penelitiannya pada temperatur 121 °C) terjadi mekanisme pembentukan GP *zones*. Pada tahap awal (30 menit pertama) ditemukan daerah GPI *zones* yang dominan, dan mereka tidak menemukan daerah GPII *zones* dengan jelas. Liddicoat<sup>[18]</sup>, studi *ageing* paduan Al-2.0Zn-1.8Mg-0.7 (at. %) tidak ditemukan bukti keberadaan GP *zones*, sehingga rangkaian presipitasi mengikuti persamaan  $\beta$ . Dimana persamaan ini mengikuti reaksi dari SSSS  $\rightarrow$  "nuclei"  $\rightarrow$   $\eta'$   $\rightarrow$   $\eta$  (MgZn<sub>2</sub>).

Analisa *high-resolution transmission electron microscope* (HRTEM) dan *selected area diffraction* (SAD) mengkonfirmasi bahwa terdapat dua tipe GPZs dengan struktur yang berbeda GPI dan GPII, berada dalam paduan Al-Zn-Mg setelah penuaan artifisial. GPI *zones* koheren terhadap matriks Al, dengan

keteraturan internal dari Zn dan Al/Mg pada bidang  $\{001\}_{Al}$ , dan terbentuk pada rentang temperatur yang besar, dari temperatur ruang sampai 140-150 °C, tergantung pada temperatur *quenching*. GPII kaya akan seng (Zn-rich) pada bidang  $\{111\}$  dan terbentuk setelah *quenching* pada temperatur diatas 450 °C dan temperatur *ageing* diatas 70 °C<sup>[19]</sup>.

Gang dan Cerezo<sup>[17]</sup> membagi GPI zones daerah GPI zones kecil (< 30 atom terlarut) dan GPI zones besar. GPI zones kecil kaya akan Mg, dengan rasio Zn/Mg  $\approx 0.9$  sedangkan zona GPI yang lebih besar memiliki rasio Zn/Mg  $\approx 1$  sehingga lebih stabil dan cenderung akan tumbuh. Proses nukleasi dan tumbuh ini disebut dengan presipitasi diskontinu (*discontinuous precipitation*) pada paduan Al-Zn<sup>[20]</sup> yang diobservasi terjadi pada Al-Zn larutan padat (lebih dari 20 % Zn), lewat jenuh (*supersaturated*) melalui *continuous cooling* dan *ageing* pada temperatur rendah. Kelanjutan dari GPI zones kecil<sup>[17]</sup> adalah bertransformasi menjadi *cluster elongated* (Zn/Mg  $\approx 1.1$ ) kemudian menjadi *platelet*  $\eta'$  yang semakin kaya akan Zn (Zn/Mg  $\approx 1.2$ ). Dari observasinya, hanya sedikit  $\eta'$  yang terbentuk dari pertumbuhan GPI zones yang lebih besar.

Sehingga, menurut Gang dan Cerezo<sup>[17]</sup> pada tahap paling awal semua *cluster* kaya akan Mg sebagai akibat dari interaksi *vacancy* Mg yang kuat. Hal ini sesuai dengan penelitian lainnya<sup>[21]</sup> yang menyebutkan bahwa mekanisme presipitasi via nukleasi *vacancy-rich* sangat mendominasi pada temperatur diatas 115 °C. Charai, *et al.*<sup>[22]</sup> mengungkapkan bahwa *vacancy supersaturation* tergantung pada kecepatan *quench* yang mendukung untuk evolusi *cluster* menjadi GP zones. Pada tahap selanjutnya setelah pembentukan GP zones adalah terbentuknya  $\eta'$  dan kemudian bertransformasi menjadi  $\eta$  atau  $MgZn_2$  yang stabil<sup>[17]</sup>. Hal ini sesuai dengan Hadjadj dan Amira<sup>[7]</sup> yang mengatakan bahwa  $\eta'$  merupakan fasa metastabil yang koheren atau semi koheren dengan matriks dan merupakan tahap penting dari mekanisme pengerasan material<sup>[7,23]</sup>, dimana mereka tumbuh dari *cluster vacancies* atau GP zones.

Namun dalam penelitian Gjønnnes dan Simensen<sup>[23]</sup> tidak menemukan bukti bahwa GP zones mendahului pembentukan fasa  $\eta'$  (unit sel monoklinik dengan  $a = b = 4.97 \text{ \AA}$ ,  $c = 5.54 \text{ \AA}$  dan  $\gamma = 120^\circ$  dengan komposisi  $\text{MgZn}_2$ ).  $\eta'$ -pelat bertransformasi menjadi  $\eta$  dengan bentuk dan orientasi yang sama maupun berbeda terhadap matriks. Partikel  $\eta$  dengan bentuk dan orientasi yang berbeda dengan matriks hanya  $\eta$ -pelat pada  $\{111\}_{\text{Al}}$  dan  $\eta$ -rod  $\langle 110 \rangle_{\text{Al}}$  yang terdapat dalam jumlah besar<sup>[23]</sup>.

Penelitian lain menyebutkan bahwa nukleasi dari GP zones pada paduan Al-Zn-Mg terjadi oleh *clustering* atom-atom Zn, sedangkan presipitasi Mg hanya terjadi pada proses pertumbuhan<sup>[24]</sup>. Kecepatan difusi dari Cu lebih rendah daripada Zn dan Mg<sup>[8,15,25]</sup> sehingga jumlah Cu pada presipitat akan meningkat seiring dengan kenaikan temperatur perlakuan panas (pada kisaran 135-160 °C). Dari penelitian-penelitian tersebut terlihat bahwa komposisi presipitat tergantung dari pelarutan atom-atom yang disesuaikan dengan komposisi paduan dan temperatur perlakuan panas.

Pada penelitian ini, juga akan diinvestigasi *cluster* terlarut dan presipitat yang terbentuk dari beberapa komposisi paduan Al-Zn-Mg-Cu guna memahami hubungan antara *cluster* dengan respons *rapid hardening* serta mikrostruktur presipitat yang terbentuk pada *peak hardness* paduan aluminium. Karakterisasi TEM dilakukan untuk mengungkap evolusi mikrostruktur presipitat. Analisa lebih jauh dengan *atom probe* perlu dilakukan untuk mengevaluasi mikrostruktur *clustering* dan presipitat. *3-dimensional atom probe* (3DAP) mampu menganalisa material pada skala atomik dengan cara yang unik terkait dengan kemampuannya untuk mengukur komposisi kimia dari individu-individu presipitat<sup>[26]</sup>.

## 1.2 Permasalahan

*Rapid hardening* merupakan fenomena pengerasan paduan aluminium pada saat-saat awal perlakuan panas. Fenomena ini dipercaya terjadi karena adanya *cluster* paduan aluminium yang terbentuk di awal *ageing* setelah *solution treatment* dan *quenching*. Pengerasan yang terjadi dalam mekanisme ini cukup signifikan dimana dapat terlihat dari kemiringan peningkatan kekerasan setelah *ageing* (grafik kekerasan v.s waktu *ageing*) pada tahap-tahap awal. Untuk mengetahui pengaruh unsur terhadap fenomena *rapid hardening* dalam paduan Al-Zn-Mg-Cu maka percobaan dilakukan dengan variasi komposisi dalam kisaran yang cukup besar. Komposisi Zn dan Mg dibuat dalam rentang 1.7-3.0 at. % serta konsentrasi Cu 0.4-1.6 at. %. Dari kisaran ini, dapat dibuat beberapa kombinasi yang sama dengan paduan aluminium seri 7xxx di pasaran. Berdasarkan kisaran di atas, unsur Zn dan Mg dibagi kedalam 4 komposisi yang sama 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.

Paduan ini dibuat dengan teknik pengecoran dari *ingot* Al, Zn, Mg dan Cu pada mesin cor induksi vakum di University of Sydney. Parameter pengecoran yang tepat harus ditentukan untuk menghasilkan paduan yang baik. Mikrostruktur hasil pengecoran akan diamati dengan mikroskop optik. Setelah pengecoran dilakukan homogenisasi pada temperatur 500 °C selama 24 jam. Selanjutnya dilakukan proses pengerolan panas hingga sampel mencapai ketebalan 1 mm. Kemudian dilakukan proses perlakuan panas *solution treatment-quenching-ageing* pada setiap sampel. Pengukuran kekerasan akan dilakukan pada sampel setelah *ageing*. Evolusi mikrostruktur sebagai respon dari *age hardening* dilakukan dengan mikroskop optik, *Scanning Electron Microscope* (SEM) dan *Energy Dispersive Spectroscopy* (EDS), *High Resolution SEM* serta *Transmission Electron Microscope* (TEM). Karakterisasi TEM juga dilakukan untuk mengungkap mikrostruktur presipitat.

### 1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk:

- 1) menentukan parameter proses yang sesuai pada mesin cor induksi vakum untuk pengecoran paduan Al-Zn-Mg-Cu dari *ingot* masing-masing unsur paduannya.
- 2) menganalisis parameter proses homogenisasi dan pengerolan yang sesuai untuk paduan Al-Zn-Mg-Cu.
- 3) mengetahui peranan tiap unsur utama dalam paduan Al-Zn-Mg-Cu terhadap pengerasan presipitasi setelah *ageing* pada temperatur 120 °C dan 190 °C.
- 4) mempelajari mekanisme fenomena *rapid hardening* pada paduan Al-Zn-Mg-Cu dalam berbagai variasi komposisi setelah *ageing* pada temperatur 190 °C.
- 5) mengetahui kombinasi komposisi elemen paduan Al-Zn-Mg-Cu optimum untuk mencapai kekerasan maksimum setelah *ageing* pada temperatur 120 °C dan 190 °C.
- 6) mempelajari *clustering* dan presipitat yang terbentuk pada paduan Al-Zn-Mg-Cu setelah perlakuan panas.

### 1.4 Ruang Lingkup Penelitian

#### 1.4.1 Material

- 1) *Ingot* Al, Zn, Mg dan Cu.
- 2) *Aluminium foil* untuk membungkus Zn, Mg dan Cu dalam proses pengecoran.

#### 1.4.2 Parameter Penelitian

- 1) Dua puluh paduan Al-Zn-Mg-Cu dengan variabel komposisi Zn dan Mg yang sama 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. %)
- 2) Proses pengecoran dilakukan dengan *Indutherm Vacuum Tilting Casting Machine VTC200* pada temperatur 715-840 °C dan tekanan  $10^2$  N/m<sup>2</sup>.
- 3) Aluminium foil digunakan untuk membungkus ingot dengan titik lebur yang lebih rendah yaitu Mg dan Zn.

- 4) Temperatur paduan Al-Zn-Mg-Cu dijaga konstan pada temperatur 715-750 °C selama 6-11 menit.
- 5) Temperatur maksimum pengecoran berkisar antara 732-840 °C tergantung pada daya generator mesin awal dan pengaturannya selama proses pengecoran.
- 6) Temperatur tuang logam paduan berkisar antara 713-764 °C.
- 7) Proses homogenisasi dilakukan pada temperatur 500 °C selama 24 jam kemudian di-*quench* ke dalam air dengan temperatur 18-21 °C.
- 8) Pengujian komposisi, dimana pengambilan sampel dilakukan dengan pengeboran 5 titik arah vertikal pada *billet* mengikuti standar ASTM E 88 - 91.
- 9) Pengerolan panas dilakukan dengan alat rol manual terhadap  $\frac{1}{4}$  bagian *billet* pada rentang temperatur *preheating* 290-430 °C selama  $\pm 1$  jam arah pengerolannya diubah 180° setiap laluan dan dilakukan pemanasan ulang selama  $\pm 20$  menit setiap 5 laluan.
- 10) Deformasi berkisar antara 0.05-0.3 mm tergantung pada ketebalan awal material pada setiap laluannya.
- 11) Rata-rata ketebalan akhir adalah 1.86775 mm dengan rata-rata % reduksi pengerolan panas sebesar 68.19 %.
- 12) Dimensi sampel untuk perlakuan panas dan pengujian kekerasan adalah  $\pm 6 \times 20$  mm.
- 13) *Solution treatment* dilakukan di dalam *salth bath* pada temperatur 470 °C selama 90 menit (lalu *quench* di dalam air dengan temperatur 18-21 °C) kemudian dilanjutkan dengan perlakuan panas di dalam *oil bath* pada variasi temperatur *ageing* 120 °C (untuk 20 paduan) dan 190 °C (untuk paduan Al-1.7Zn-1.7-Mg-0.4 dan 0.7 Cu serta Al-2.9Zn-2.9Mg-0.4 dan 0.7 Cu (at. %)) dan variasi waktu *ageing* dari 10 detik sampai 2 minggu untuk membentuk kurva kekerasan.
- 14) Pengujian kekerasan dilakukan sebanyak 10 titik setiap sampel dengan menggunakan *Leco Vicker Hardness Tester LV700AT* pada beban 3 kgf dan *dwell time* 10 detik.

### 1.4.3 Tempat Penelitian

- 1) Proses pembuatan sampel dilakukan di Australian Centre for Microscopy and Microanalysis (ACMM) dan Departement of Civil Engineering (untuk beberapa persiapan sampel) The University of Sydney, Australia.
- 2) Pengujian komposisi dilakukan di Analytical Centre The University of New South Wales, Australia.
- 3) Pengamatan mikrostruktur *as cast*, analisis struktur sampel setelah perlakuan panas dengan menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscope*) dan EDS (*Electron Dispersive Spectroscopy*), HRSEM (*High Resolution Scanning Electron Microscope*) dan TEM (*Transmission Electron Microscopy*) dilakukan di Australian Centre for Microscopy and Microanalysis (ACMM) The University of Sydney, Australia.
- 4) Pengamatan struktur mikro setelah perlakuan panas dan analisis struktur salah satu sampel dengan menggunakan dengan menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscope*) dan EDAX dilakukan di laboratorium metalografi dan laboratorium SEM di Departemen Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- 5) Homogenisasi, pengerolan, dan perlakuan panas pada sampel serta pengujian kekerasan mikro dilakukan di Australian Centre for Microscopy and Microanalysis (ACMM) The University of Sydney, Australia.

### 1.5 Manfaat Penelitian

Diharapkan hasil dari penelitian ini dapat memberikan suatu pengetahuan mengenai kombinasi komposisi elemen paduan Al-Zn-Mg-Cu yang optimum untuk mendapatkan kekerasan maksimum sebagai respons terhadap perlakuan panas pengerasan presipitasi. Penelitian yang dilakukan terhadap 20 komposisi paduan Al-Zn-Mg-Cu ini juga diharapkan dapat memberikan gambaran proses pembuatan (pemaduan, *homogenizing* dan *rolling*) yang sesuai. Analisis mikrostruktur dan presipitat diharapkan dapat menjelaskan fenomena pengerasan dan *clustering* yang terjadi.

## BAB 2

### STUDI LITERATUR

#### 2.1 Aluminium dan Paduannya

Aluminium merupakan logam utama beberapa paduan mutakhir ringan (*advance light alloy*) pada industri penerbangan yang sekarang sedang banyak dikembangkan. Aluminium murni berwarna keputih-putihan yang beratnya hampir tiga kali lebih ringan jika dibandingkan dengan baja dan tembaga<sup>[27]</sup>. Berat jenis logam yang memiliki struktur kristal FCC (*face centered cubic*) ini adalah  $2.71 \text{ g/cm}^3$  pada temperatur kamar dan memiliki titik lebur sebesar  $660.4 \text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[28]</sup>. Aluminium juga memiliki ketahanan korosi yang tinggi di lingkungan air, industri, dan atmosfer laut karena aluminium dapat membentuk lapisan pasif aluminium oksida yang tipis di permukaannya. Selain itu, aluminium juga memiliki sifat *machinability*, *formability*, *workability*, dan *castability* yang cukup bagus. Salah satu kekurangan aluminium adalah kekuatan dan kekerasannya yang rendah. Kekuatan aluminium murni hanya mencapai  $7.2 \text{ kg/mm}^2$  sedangkan kekerasannya 19 BHN<sup>[27]</sup>.

Aluminium dalam aplikasinya selalu dipadukan dengan unsur lain, karena keterbatasan pada faktor kekuatan dan kekerasannya<sup>[27]</sup>. Unsur paduan dalam aluminium dapat mempengaruhi mikrostruktur yang nantinya berdampak pada sifat mekanis, fisik dan kimia. Penambahan sejumlah elemen paduan pada aluminium murni akan meningkatkan sifat dan kegunaan secara umum.

##### 2.1.1 Pengaruh Unsur Paduan pada Aluminium

Unsur lain dalam paduan aluminium tuang akan memberikan pengaruh terhadap karakteristik paduan. Unsur ini dapat sengaja ditambahkan ataupun telah ada dengan sendirinya dalam paduan aluminium ini. Pengaruh unsur lain ini ada yang menguntungkan tetapi juga ada yang merugikan. Unsur paduan yang sengaja ditambahkan bertujuan untuk meningkatkan sifat mekanis seperti kekuatan, keuletan, mampu permesinan dan sifat-sifat lainnya sesuai dengan kebutuhan.

Unsur paduan memiliki keterbatasan kadar dalam pemakaiannya, karena jika terlalu banyak justru akan mengganggu sifat utama dari aluminium. Adapun kelarutan maksimum dari unsur-unsur paduan dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Universitas Indonesia



**Tabel 2.1.** Kelarutan maksimum dari unsur-unsur paduan utama pada aluminium<sup>[4]</sup>.

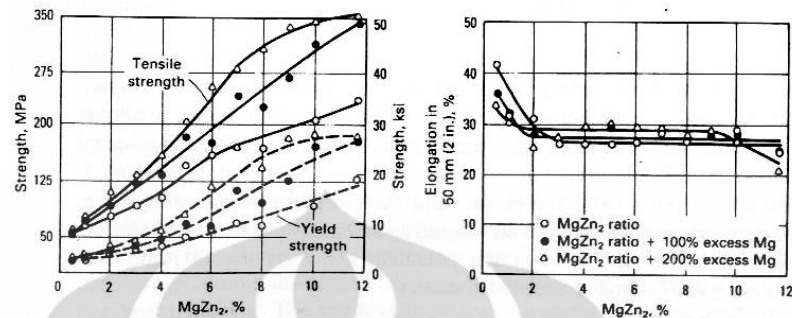
Unsur Paduan	Kelarutan Maksimum		
	Persen Berat (wt.%)	Persen Atom (at.%)	Temperatur (°C)
Cu	5.6	2.5	548
Mg	14.9	16.3	450
Mn	1.8	0.9	658
Si	1.6	1.6	577
Zn	82.8	66.4	382
Mg <sub>2</sub> Si	1.8	1.9	595
MgZn <sub>2</sub>	16.9	9.6	475

### 1. Seng (Zn)

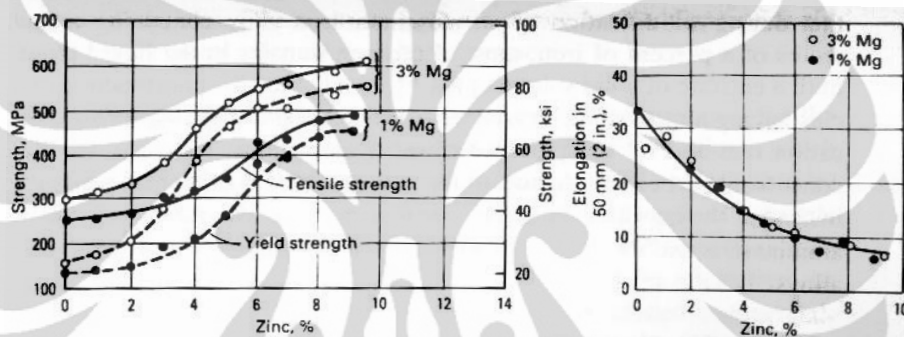
Penambahan seng pada aluminium yang melebihi 3 wt. %, dapat meningkatkan kekuatan aluminium cukup pesat. Namun, jika kurang dari itu seng (Zn) hanya dianggap tidak berguna. Pengaruh unsur Zn terhadap sifat mekanis paduan aluminium ditunjukkan pada Gambar 2.1 dan Gambar 2.2. Penambahan seng (Zn) tidak memiliki pengaruh yang signifikan bila hanya ditambahkan ke dalam paduan Al-Si. Akan tetapi bila dipadukan bersama dengan tembaga Cu dan/atau magnesium maka akan menghasilkan komposisi *heat-treatable* yang berpengaruh meningkatkan kekerasan dan kekuatan karena membentuk presipitat MgZn<sub>2</sub>, CuAl<sub>2</sub>. Akan tetapi pengaruh buruk penambahan Zn ini dapat meningkatkan kegetasan dan menurunkan ketangguhan<sup>[29]</sup>.

Dua fasa dapat terbentuk melalui dekomposisi eutektik dari paduan komersial Al-Zn-Mg, yaitu  $\eta$ -MgZn<sub>2</sub> (heksagonal) dan Al<sub>2</sub>Mg<sub>3</sub>Zn<sub>3</sub> (bcc). Tergantung daripada rasio Zn/Mg, paduan Cu-bebas diperkuat oleh fasa metastabil, baik itu MgZn<sub>2</sub> atau Al<sub>2</sub>Mg<sub>3</sub>Zn<sub>3</sub>. Didasarkan pada studi oleh Maloney *et al.*<sup>[26]</sup> dan Cerezo *et al.*<sup>[17]</sup> dimana rasio Zn:Mg atau (Zn+Cu):Mg pada pembentukan fasa  $\eta'$  pada mayoritas kasus adalah ~ 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<sub>2</sub> membentuk Mg(Zn,Cu,Al)<sub>2</sub>. Partikel Al<sub>2</sub>CuMg 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 material. Efek-efek merugikan seng lainnya adalah menurunkan kemampuan cor, meningkatkan

kecenderungan terjadinya *stress corrosion cracking*, *shrinkage*, dan retak panas<sup>[30]</sup>.



**Gambar 2.1.** Efek MgZn<sub>2</sub> dan MgZn<sub>2</sub> dengan Mg sisa terhadap sifat mampu tarik dari *wrought* 95 % Al; specimen 1.59 mm, dicelup pada air dingin dari 470 °C<sup>[31]</sup>.



**Gambar 2.2.** Efek Zn pada paduan Al-1.5Cu-Mg dan Al-1.5Cu-3Mg. Paduan dengan 1 % Mg dilaku panas pada 495 °C, sedangkan paduan 3 % Mg pada 460 °C. Seluruh sample dicelup pada air dingin, dituakan selama 12 jam pada 135 °C<sup>[31]</sup>.

## 2. Magnesium (Mg)

Kelarutan atom magnesium dalam aluminium murni pada temperatur kamar cukup besar yaitu 2.5 wt. %. Dengan kelarutan tersebut, magnesium mampu meningkatkan kekerasan aluminium dengan membentuk larutan padat (*solid solution*). Jika terdapat silikon, magnesium dapat memberikan pengerasan endapan (*precipitation hardening*) dengan terbentuknya fasa Mg<sub>2</sub>Si, sementara bersama Cu atau Zn akan membentuk presipitat Al-Cu-Mg, Al-Zn-Mg atau MgZn<sub>2</sub> yang sangat halus. Pengaruh Mg lainnya antara lain meningkatkan ketahanan korosi, akan tetapi Mg berpengaruh buruk yakni menurunkan sifat mampu cor (*castability*)<sup>[32]</sup>.

### 3. Tembaga (Cu)

Unsur tembaga sebagai paduan akan meningkatkan kekuatan dan kekerasan logam saat *as cast* dan saat dilakukan perlakuan panas dengan membentuk fasa kedua  $Al_2Cu$ . Peningkatan sifat mekanik mencapai nilai maksimalnya ketika paduan aluminium yang mengandung tembaga diberikan perlakuan pengerasan endapan (*precipitation hardening*). Terbentuknya fasa  $Al_2Cu$  halus yang terdispersi merata di seluruh paduan menambah kekerasan dan kekuatan aluminium. Selain itu, tembaga juga dapat meningkatkan sifat aluminium terhadap temperatur tinggi dan meningkatkan *machinability*<sup>[30]</sup>. Namun unsur ini dapat mengurangi ketahanan terhadap *hot tear* (retak panas), fluiditas dan ketahanan korosi<sup>[31]</sup>.

### 4. Silikon (Si)

Silikon adalah unsur yang paling sering ditemui pada paduan aluminium karena dapat memperbaiki karakteristik coran. Kelarutan silikon dalam aluminium pada temperatur ruang tidak lebih dari 0.1 wt. % saja, sehingga sebagian besar silikon membentuk fasa sendiri<sup>[30]</sup>. Morfologi eutektik silikon menimbulkan sifat aluminium menjadi lebih keras dan getas. Oleh karena itu, semakin banyak kandungan silikon pada paduan aluminium maka kekuatan akan meningkat dan keuletan menurun. Selain itu silikon dapat menyebabkan sifat mampu permesinan yang kurang baik<sup>[29]</sup>.

### 5. Mangan (Mn)

Mangan biasanya dianggap sebagai pengotor dalam komposisi coran, sehingga harus dikendalikan agar tetap rendah dalam proses *gravity casting*. Tanpa melakukan *work hardening*, mangan tidak memberikan efek yang signifikan pada coran paduan aluminium. Pada paduan yang mengandung Cu, Mn akan membentuk partikel presipitat *dispersoid*  $Al_{20}Cu_2Mn_3$ . Beberapa penelitian menunjukkan bahwa fraksi volume yang tinggi dari  $MnAl_6$  pada paduan aluminium yang mengandung lebih dari 0.5 % Mn akan memiliki pengaruh yang menguntungkan pada mutu internal dari coran<sup>[33]</sup>.

#### 6. Nikel (Ni)

Kelarutan nikel pada aluminium di temperatur kamar tidak lebih dari 0.04 wt. %. Lebih dari batas ini, nikel hadir dalam bentuk intermetalik, biasanya berkombinasi dengan besi, mangan, atau silikon. Nikel dianggap sebagai pengotor dan jumlah nikel pada aluminium biasanya dibatasi agar tidak lebih dari 0.5 wt. %. Unsur nikel umumnya digunakan bersama dengan tembaga untuk meningkatkan kekuatan pada temperatur tinggi. Nikel juga mengurangi koefisien ekspansi thermal.

#### 7. Kromium (Cr)

Kromium digunakan untuk mengontrol struktur butir, untuk menjaga pertumbuhan butir pada paduan aluminium-magnesium-seng selama proses *hot working* atau *heat treatment*. Kromium memiliki laju difusi yang rendah dan membuat fasa halus yang terdispersi pada produk tempa. Fasa terdispersi ini mencegah nukleasi dan pertumbuhan butir<sup>[13]</sup>.

#### 8. Titanium (Ti)

Titanium merupakan unsur minor pada paduan aluminium. Titanium digunakan sebagai penghalus butir (*grain refiner*) pada paduan aluminium. Penghalus butir untuk aluminium yang sering digunakan adalah *master alloy* aluminium-titanium dan aluminium-titanium-boron<sup>[34]</sup>.

#### 9. Stronsium (Sr)

Stronsium digunakan sebagai unsur yang memodifikasi kristal silikon eutektik. Modifikasi yang efektif akan didapatkan dengan penambahan Sr pada kadar yang rendah<sup>[33]</sup>.

#### 10. Besi (Fe)

Besi (Fe) merupakan pengotor yang paling umum ditemukan pada aluminium<sup>[33]</sup>. Unsur ini memiliki kelarutan yang tinggi pada lelehan aluminium. Kelarutan dari Fe pada kondisi padat sangat rendah (~ 0.05 %), sehingga sebagian besar Fe muncul sebagai fasa intermetalik dalam kombinasinya dengan aluminium dan unsur paduan lainnya. Unsur Fe ditambahkan pada paduan Al-Cu-Ni guna meningkatkan kekuatan pada temperatur tinggi. Umumnya, kehadiran Fe dapat ditolerir pada level 1.5 % hingga 2.0 %. Keberadaan Fe akan memodifikasi fasa Si dengan hadirnya fasa Al-Fe-Si. Bentuk yang umum dari fasa ini adalah fasa  $\alpha$  dan

$\beta$ . Fasa  $\alpha$  memiliki struktur kristal kubik dan muncul pada mikrostruktur sebagai eutektik *Chinese script*. Fasa  $\beta$  yang lebih jarang umumnya muncul dalam bentuk struktur jarum (*needle*) atau platelet. Fasa Fe lain seperti  $Al_7Cu_2Fe$ ,  $Al_6Fe$  dan  $FeAl_3$  dapat pula ditemukan pada paduan aluminium. Penambahan Fe dapat meningkatkan ketahanan terhadap *hot tear* namun menurunkan sifat mampu cor, seperti *flowability*.

### 2.1.2 Aluminium seri 7xxx

Menurut Aluminium Association of United States (AA), paduan aluminium diklasifikasikan menjadi dua macam yaitu paduan aluminium tempa (*wrought aluminium alloys*) dan paduan aluminium tuang (*cast aluminium alloys*)<sup>[35]</sup>. Paduan aluminium tuang memiliki komposisi khusus yang diciptakan tidak hanya untuk mendapatkan kekuatan, ketangguhan, dan ketahanan korosi, melainkan juga untuk mendapatkan sifat mampu cor yang baik. Aluminium tuang memiliki komposisi silikon yang lebih tinggi dibandingkan dengan aluminium tempa. Silikon membentuk sistem eutektik sederhana dengan aluminium, sehingga pada tahap akhir pembekuan akan ada aluminium cair yang tetap encer untuk membeku secara normal ke rongga cetakan. Sistem penamaan pada aluminium paduan cor (*casting alloy*) seperti ditunjukkan pada Tabel 2.2 adalah sebagai berikut<sup>[36]</sup>:

1. Digit pertama menentukan jenis unsur paduan utamanya.
2. Digit kedua dan ketiga menandakan modifikasi dari paduan.
3. Digit keempat (setelah tanda desimal) menunjukkan bentuk produk.

Misalnya, xxx.0 – *casting*, xxx.1 – *foundry ingot*, dan seterusnya.

**Tabel 2.2.** Klasifikasi aluminium paduan cor (*casting alloys*)<sup>[37]</sup>.

Seri	Komposisi	Hardenability
1xx.x	Al murni	<i>Non heat treatable</i>
2xx.x	Al-Cu	<i>Heat treatable</i>
3xx.x	Al-Si-Cu atau Al-Mg-Si	<i>Non heat treatable</i>
4xx.x	Al-Si	<i>Non heat treatable</i>
5xx.x	Al-Mg	<i>Non heat treatable</i>
6xx.x	Seri yang tidak digunakan	-
7xx.x	Al-Zn	<i>Heat treatable</i>
8xx.x	Al-Sn	<i>Heat treatable</i>
9xx.x	Seri yang tidak digunakan	-

Sistem penamaan aluminium tempa (*wrought alloy*) seperti ditunjukkan pada Tabel 2.3 tidak jauh berbeda dengan penamaan sebelumnya (*cast alloy*) yaitu sebagai berikut<sup>[38]</sup>:

1. Digit pertama menentukan jenis unsur paduan utamanya.
2. Digit kedua menandakan modifikasi dari paduan. Jika digit keduanya 0 mengindikasikan paduan orisinal, *integer* 1-9 menunjukkan adanya modifikasi pada paduan orisinal.
3. Digit ketiga dan keempat tidak menunjukkan signifikansi khusus, hanya untuk membedakan kelompok paduan aluminium yang berbeda.

**Tabel 2.3.** Klasifikasi aluminium tempa (*wrought alloys*)<sup>[37,38]</sup>.

Seri	Komposisi
1xxx	Al murni
2xxx	Elemen utama Cu
3xxx	Manganese
4xxx	Silikon
5xxx	Magnesium
6xxx	Magnesium dan Silikon
7xxx	Seng
8xxx	Elemen lain
9xxx	Seri yang tidak digunakan

Semua paduan komersil aluminium seri 7xxx memiliki kandungan seng lebih banyak dibandingkan dengan magnesium. Terdapat sedikit paduan komersial dengan  $Zn:Mg < 1$ , namun biasanya mereka dianggap sebagai paduan aluminium-magnesium karena sifat dan strukturnya lebih dekat dengan paduan aluminium-magnesium. Tabel 2.4 menunjukkan batas komposisi unsur pada paduan komersil aluminium-seng-magnesium, dan Tabel 2.5 merupakan contoh beberapa paduan aluminium seri 7xxx yang komersil di pasaran.

**Tabel 2.4.** Batas komposisi untuk paduan komersil aluminium-seng-magnesium<sup>[39]</sup>.

Elemen	Komposisi (wt. %)
Zn	2-8
Mg	0.5-4
Cu	0-3
Fe	0.1-0.8
Si	0.05-0.3
Cr	0-0.5
Mn	0-1.5
Ti	0-0.5
B	0-0.05
Zr	0-0.25
Ag	0-1.0
Be	0-0.10
Elemen lain	< 0.05 each

**Tabel 2.5.** Beberapa paduan aluminium seri 7xxx yang komersil di pasaran<sup>[40]</sup>.

No	Nama Paduan	UNS No.	Komposisi (wt. %)																	
			Si		Fe		Cu		Mn		Mg		Cr		Ni		Zn		Ti	
			Nom	Lim	Nom	Lim	Nom	Lim	Nom	Lim	Nom	Lim	Nom	Lim	Nom	Lim	Nom	Lim	Nom	Lim
1	7010	A97010	0.12	0.15	1.7	1.5-2.0	0.1	2.4	2.1-2.6	0.05	0.05	6.2	5.7-6.7	0.06						
2	7029	A97029	0.1	0.12	0.7	0.5-0.9	0.05	1.6	1.3-2.0			4.7	4.2-5.2	0.05						
3	7033	A97033	0.15	0.3	1	0.7-1.3	0.1	1.75	1.3-2.2	0.2			4.6-5.6	0.1						
4	7040	A97040	0.1	0.13	1.9	1.5-2.3	0.04	2.1	1.7-2.4	0.04			6.2	5.7-6.7	0.06					
5	7049	A97049	0.25	0.35	1.6	1.2-1.9	0.2	2.4	2.0-2.9	0.16	0.1-0.22		7.7	7.2-8.2	0.1					
6	7050	A97050	0.12	0.15	2.3	2.0-2.6	0.1	2.2	1.9-2.6	0.04			6.2	5.7-6.7	0.06					
7	7055	A97055	0.1	0.15	2.3	2.0-2.6	0.05	2	1.8-2.3	0.04			8	7.6-8.4	0.06					
8	7068	A97068	0.12	0.15	2	1.6-2.4	0.1	2.6	2.2-3.0	0.05			7.8	7.3-8.3	0.1					
9	7075	A97075	0.4	0.5	1.6	1.2-2.0	0.3	2.5	2.1-2.9	0.23	0.18-0.28		5.6	5.1-6.1	0.2					
10	Alclad 7075	Alc A97075	0.4	0.5	1.6	1.2-2.0	0.3	2.5	2.1-2.9	0.23	0.18-0.28		5.6	5.1-6.1	0.2					
11	7085	A97085	0.06	0.08	1.6	1.3-2.0	0.04	1.5	1.2-1.8	0.04			7.5	7.0-8.0	0.06					
12	7116	A97116	0.15	0.3	0.8	0.5-1.1	0.05	1.1	0.8-1.4				4.7	4.2-5.2	0.05					
13	7129	A97129	0.15	0.3	0.7	0.5-0.9	0.1	1.6	1.3-2.0	0.1			4.7	4.2-5.2	0.06					
14	7149	A97149	0.15	0.2	1.6	1.2-1.9	0.2	2.4	2.0-2.9	0.1-0.22			7.5	7.2-8.2	0.1					
15	7150	A97150	0.12	0.15	2.2	1.9-2.5	0.1	2.4	2.0-2.7	0.04			6.4	5.9-6.9	0.06					
16	7175	A97175	0.15	0.2	1.6	1.2-2.0	0.1	2.5	2.1-2.9	0.23	0.18-0.28		5.6	5.1-6.1						
17	7178	A97178	0.4	0.5	2	1.6-2.4	0.3	2.8	2.4-3.1	0.23	0.18-0.28		6.8	6.3-7.3	0.2					
18	Alclad 7178	Alc A97178	0.4	0.5	2	1.6-2.4	0.3	2.8	2.4-3.1	0.23	0.18-0.28		6.8	6.3-7.3	0.2					
19	7249	A97249	0.1	0.12	1.6	1.3-1.9	0.1	2.2	2.0-2.4	0.12-0.18			7.8	7.5-8.2	0.06					
20	7250	A97250	0.08	0.1	2.2	2.0-2.4	0.1	2.1	1.9-2.3	0.04			6.1	5.7-6.5	0.06					
21	7349	A97349	0.12	0.15	1.75	1.4-2.1	0.2	2.25	1.8-2.7	0.16	0.1-0.22		8.1	7.5-8.7						
22	7449	A97449	0.12	0.15	1.75	1.4-2.1	0.2	2.25	1.8-2.7	0.16			8.1	7.5-8.7						
23	7475	A97475	0.1	0.12	1.6	1.2-1.9	0.06	2.2	1.9-2.6	0.22	0.18-0.25		5.7	5.2-6.2	0.06					
24	Alclad 7475	Alc7475	0.1	0.7	0.12	1.2-1.9	0.06		1.9-2.6		0.18-0.25			5.2-6.2	0.06					

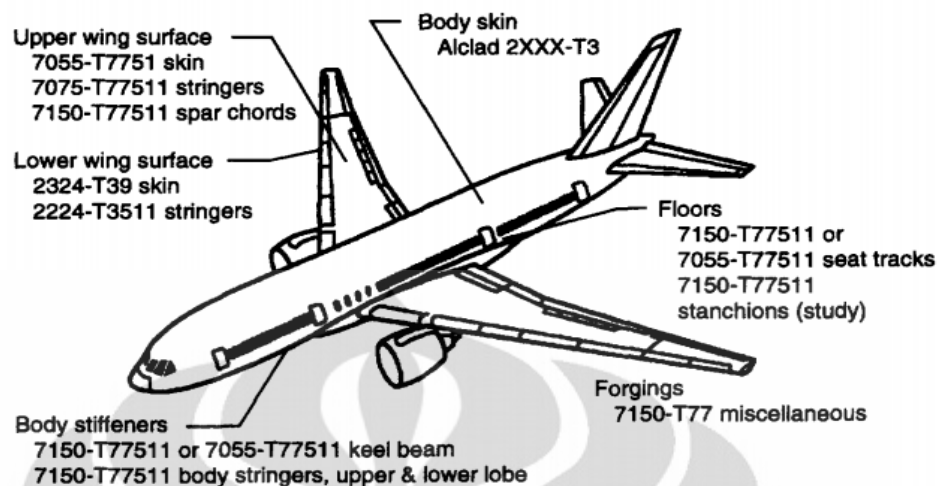
### 2.1.3 Al-Zn-Mg-Cu

Berdasarkan Tabel 2.2., aluminium seri 7xxx memiliki paduan utama unsur Zn dan bersifat *heat treatable* atau *age-hardenable*. Selama *age-hardening* (juga dikenal dengan *precipitation hardening*), presipitat terbentuk di dalam suatu *super saturated solid solution* dan kekuatan meningkat seiring dengan meningkatnya ukuran dan jumlah presipitat hingga mencapai nilai maksimum, kemudian material menjadi *over ageing* serta pengkasaran butir sehingga sifat mekanik berkurang<sup>[41]</sup>.

Paduan Al-Zn-Mg-Cu yang merupakan bagian dari aluminium seri 7xxx dengan seng sebagai komponen penguat utama. Penambahan Cu dapat mengurangi *hot shortness*, meningkatkan *castability* dan ketahanan terhadap *stress corrosion cracking* (SCC) pada paduan Al-Zn-Mg dan peningkatan efek *age hardening* secara signifikan<sup>[42]</sup>. Paduan Al-Zn-Mg-Cu digunakan terutama dalam industri pesawat dan otomotif karena kekuatannya yang tinggi dan sifat *heat treatability* yang dimiliki<sup>[39]</sup>.

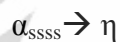
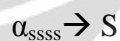
Paduan aluminium-seng-magnesium-tembaga memiliki aplikasi penting dalam industri penerbangan. Dalam aeronautika, paduan aluminium seri 7000 dengan kandungan Cu ini banyak digunakan khususnya pada struktur sayap (lihat Gambar 2.3). Selama 60 tahun terakhir, banyak penelitian-penelitian besar yang difokuskan 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<sup>[2]</sup>.





**Gambar 2.3.** Aplikasi paduan aluminium seri 2xxx dan 7xxx pada pesawat Boeing 777 (*courtesy of Brian Smith*).

Pada paduan Al-Zn-Mg-Cu, beberapa fasa terbentuk sebagai fungsi dari serangkaian presipitasi, yaitu<sup>[4]</sup>:



Pada rangkaian presipitasi pertama, fasa S ( $\text{Al}_2\text{CuMg}$ ) mengendap secara langsung dari *super saturated solid solution* ( $\alpha_{\text{SSSS}}$ ) dan memiliki struktur ortorombik. Pada rangkaian presipitasi kedua, fasa intermediate T' dengan struktur hexagonal terbentuk dari dekomposisi *super saturated solid solution* ( $\alpha_{\text{SSSS}}$ ). Selanjutnya fasa T terbentuk dengan rumus kimia  $\text{Mg}_{32}(\text{Al,Zn})_{49}$ , dimana fasa ini sudah tidak lagi koheren dengan matriks aluminium. Pada rangkaian presipitasi ketiga, *supersaturated solid solution* ( $\alpha_{\text{SSSS}}$ ) terdekomposisi membentuk *vacancy rich clusters*, GP zone,  $\eta'$  dan  $\eta$ . Fasa  $\eta'$  berstruktur hexagonal dan merupakan tahap menengah untuk menjadi fasa  $\eta$  ( $\text{MgZn}_2$ ) yang juga berstruktur hexagonal. Komposisi kimia dan komposisi fasa dari beberapa paduan cor aluminium dapat dilihat pada Tabel 2.6. Fasa yang mungkin muncul pada dalam paduan Al-Zn-Mg lebih lanjut diuraikan pada Tabel 2.7.

**Tabel 2.6.** Komposisi kimia dan komposisi fasa dari paduan cor aluminium (tanpa pengotor)<sup>[3]</sup>.

Paduan Aluminium	Si (%)	Mg (%)	Cu (%)	Zn (%)	Komposisi Fasa Eutectic	Fasa Penguat*	T (°C)
Al-Si	4.5-13	-	-	-	Al+Si	-	577
Al-Si-Mg	6-11	0.1-0.6	-	-	Al+Si+Mg <sub>2</sub> Si ( $\beta$ )	$\beta', \beta''$	555
Al-Si-Cu	7-13	-	1.5-5	-	Al+Si+Al <sub>2</sub> Cu	$\theta', \theta''$	525
Al-Si-Cu-Mg	4-23	0.2-1.1	0.5-8	-	Al+Si+ Al <sub>2</sub> Cu ( $\theta$ ) +Al <sub>5</sub> Cu <sub>2</sub> Mg <sub>8</sub> Si <sub>6</sub> (W)	$\theta', \theta''$ ; $\beta', \beta''$ ; S (Al <sub>2</sub> CuMg)	505
Al-Si- Cu-Mg-Zn	6-10	0.1-0.5	0.3-1.5	5-12	Al+Si+ Al <sub>2</sub> Cu ( $\theta$ ) +Al <sub>5</sub> Cu <sub>2</sub> Mg <sub>8</sub> Si <sub>6</sub> (W)	$\theta', \theta''$ ; $\beta', \beta''$ ; S (Al <sub>2</sub> CuMg)	505
Al-Cu	-	-	3.5-11	-	Al+Al <sub>2</sub> Cu	$\theta', \theta''$	548
Al-Mg	-	2.5-12	-	-	Al+Al <sub>8</sub> Mg <sub>5</sub>	-	450
Al-Mg-Zn	-	0.5-2.4	-	2.5-6.5	Al+MgZn <sub>2</sub> ( $\eta$ ) +Al <sub>3</sub> Mg <sub>2</sub> Zn (T)	$\eta, \eta', T'$	475
Al-Zn-Mg-Cu	-	1.5-2.5	0.4-1.5	5-8	Al+M+T (Al, Cu, Mg, Zn)	$\eta, \eta'$	470-475

\*Terbentuk setelah *solution heat treatment, quenching, dan ageing***Tabel 2.7.** Fasa yang mungkin muncul pada dalam paduan Al-Zn-Mg<sup>[39]</sup>.

Mg	< 1 % Mg <i>in solid soln.</i>	Zn:Mg $\ll$ 1 Mg <sub>5</sub> Al <sub>8</sub>	Zn:Mg = 1-2 Mg <sub>3</sub> Zn <sub>3</sub> Al <sub>2</sub>	Zn:Mg > 2.2 MgZn <sub>2</sub>	<i>with</i> Si Mg <sub>2</sub> Si	Cu > Mg CuMgAl <sub>2</sub>	Cr > Mg Cr <sub>2</sub> Mg <sub>3</sub> Al <sub>18</sub>	Mn > Mg (MgMn) <sub>3</sub> Al <sub>10</sub>
Zn	< 3 % Zn <i>in solid soln.</i>	> 3 % Zn Zn:Mg > 2.2 Mg <sub>3</sub> Zn <sub>3</sub> Al <sub>2</sub>	> 3 % Zn Zn:Mg > 2 MgZn <sub>2</sub>	Mn > Zn Mn <sub>5</sub> ZnAl <sub>24</sub>				
Cu	< 1 % Cu <i>in solid soln.</i>	> 1 % Cu <i>in soln. in MgZn<sub>2</sub></i> or Mg <sub>3</sub> Zn <sub>3</sub> Al <sub>2</sub>	Cu > Mg CuMgAl <sub>2</sub>	Cu > Mg CuAl <sub>2</sub>	Fe > Cu Cu <sub>2</sub> FeAl <sub>7</sub>	Fe + Mn > 1.5 % (CuFeMn)Al <sub>6</sub>		Mn > 1 % Fe < 0.2% Cu <sub>2</sub> Mn <sub>3</sub> Al <sub>20</sub>
Fe	Fe $\gg$ Si FeAl <sub>3</sub>	Fe < 3 Si Fe <sub>2</sub> SiAl <sub>8</sub>	Si < Fe (FeMn)Al <sub>6</sub>	Si < Fe (FeCr)Al <sub>7</sub>	Si > Fe (FeMn) <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> Al <sub>15</sub>	Si > Fe (CrFe) <sub>4</sub> Si <sub>4</sub> Al <sub>13</sub>	Fe > Cu Cu <sub>2</sub> FeAl <sub>7</sub>	
Si		Zn > 5 %, Si > 3Fe Mg > 3 Zn Mg <sub>2</sub> Si	Si > Fe, Mg < 3 Zn	Mn > 1/2 Fe	Si > Fe, Mg < 3 Zn	Cr > 1/2 Fe (CrFe) <sub>4</sub> Si <sub>4</sub> Al <sub>13</sub>		
Mn		Si $\ll$ Mn Si $\ll$ Mn	Si > Mn	Cr = Mn	Mn > Mg Mn > Mg	Mn > Zn		
Cr		Mn > Cu, Fe < Mn (FeMn)Al <sub>6</sub>	Zn > 5 % (FeMn) <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> Al <sub>15</sub>	Fe < Mn (CrMn)Al <sub>12</sub>	Zn < 2 Mg (MgMn) <sub>3</sub> Al <sub>10</sub>	Mn <sub>5</sub> ZnAl <sub>24</sub>		
Zr		Si < Cr (CrFe)Al <sub>7</sub>	Mn = Cr, Fe < Mn (CrMn)Al <sub>12</sub>	No Cr, Mn ZrAl <sub>3</sub>	Mn > Zr <i>in soln. in MnAl<sub>6</sub></i>	Cr > Zr <i>in soln. in CrAl<sub>7</sub></i>		

## 2.2 Pengecoran Aluminium

Lebih dari 80 % produk aluminium pada industri manufaktur dihasilkan dengan metode pengecoran. Hal ini dikarenakan aluminium dapat dengan mudah dikombinasikan dengan unsur lain (*alloying*) untuk mengatur karakteristik seperti sifat mekanis, sifat mampu cor (*castability*), sifat mampu mesin (*machinability*), *surface finish*, ketahanan korosi, konduktivitas panas dan listrik, sifat mampu las (*weldability*), dan ketahanan terhadap *hot tear* (*hot tear resistance*). Kualitas dari produk hasil pengecoran tersebut juga masih dapat ditingkatkan dengan metode modifikasi, penghalusan butir serta perlakuan panas (*heat treatment*)<sup>[43]</sup>.

Pada proses pengecoran logam cair dituang ke dalam cetakan, yang berbentuk rongga sesuai bentuk akhir yang diinginkan, lalu dibiarkan untuk membeku. Logam yang telah mengalami solidifikasi lalu dikeluarkan dari cetakan dengan cara mengeluarkan produk atau menghancurkan cetakan. Pengecoran biasanya dilakukan untuk menghasilkan produk dengan bentuk kompleks dimana akan dibutuhkan biaya yang sangat tinggi jika dibuat dengan metode lain<sup>[44]</sup>. Proses pengecoran dibagi menjadi dua jenis yang utama, yaitu *expendable* dan *non-expendable*. Pembagian tersebut didasarkan pada jenis material cetakan seperti pasir atau logam, serta metode penuangan seperti grafitasi, vakum, atau tekanan rendah<sup>[44]</sup>.

### 2.2.1 Pengecoran Induksi pada Keadaan Vakum

Pengecoran aluminium pada keadaan vakum dirancang untuk mengurangi cacat yang disebabkan oleh porositas gas. Pada pengecoran vakum, lingkungan proses dijaga pada kondisi dan tekanan tertentu sehingga gas yang terlarut dalam logam cair minimum dan kemurnian dari logam cair akan semakin baik. Melalui proses pengecoran vakum dapat dihasilkan benda berbentuk tipis dengan kualitas permukaan yang baik. Sifat mekanis dari produk cor dengan proses vakum biasanya lebih tinggi 10-15 % dibandingkan dengan pengecoran dengan sistem *gravity casting*<sup>[44]</sup>.

Pengecoran induksi vakum dapat dilakukan dengan salah satu mesin pengecoran yaitu Vacuum Tilting Machine VTC200 (lihat Gambar 2.4). Umpam dipanaskan melalui “induksi langsung” dibawah pengaruh gas pelindung argon atau nitrogen. Setelah logam mencair, maka *inductor housing* dan *vacuum chamber* diputar 90° agar logam cair tertuang ke dalam cetakan grafit / tembaga<sup>[45]</sup>.

Kegunaan utama dari pemanasan induksi yaitu temperatur peleburan dicapai dengan sangat cepat karena panas secara langsung dialirkan ke logam. Pada proses induksi, terdapat kumparan yang dialiri arus listrik dan berperan sebagai muatan negatif, sedangkan material umpam berperan sebagai muatan positif. Medan listrik diantara kedua muatan ini menghasilkan panas yang sangat tinggi yang dapat melebur material dengan cepat. Hal ini baik untuk kualitas produk cor karena dapat meminimalisir terbentuknya oksida pengotor yang mungkin terjadi pada proses pengecoran. Selama proses peleburan, logam tercampur di bawah medan magnet (*self mixing*) untuk mendapatkan pencampuran yang homogen. Pengukuran temperatur diindikasikan oleh *pyrometer*.



**Gambar 2.4.** Vacuum Tilting Machine VTC200<sup>[45]</sup>.

### 2.2.2 Proses Pembekuan

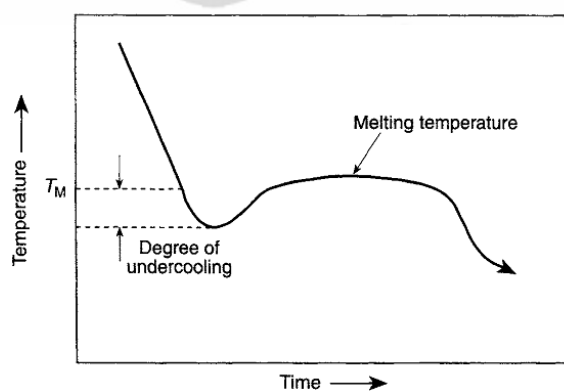
Pada dasarnya logam mengalami tiga tahap kontraksi ketika membeku dari cair ke padat, yaitu:

- a. kontraksi cair,
- b. kontraksi pembekuan, dan
- c. kontraksi padat.

Kontraksi cair terjadi ketika logam mendingin dari temperatur tuang ke temperatur beku. Kontraksi pembekuan terjadi ketika logam melalui tahap pembekuan. Sedangkan kontraksi padat terjadi pada saat logam mendingin dari temperatur beku ke temperatur ruang. Kontraksi cair dan pembekuan dapat menyebabkan penyusutan sedangkan kontraksi padat dapat menyebabkan *hot-tear*<sup>[46]</sup>. Proses pembekuan (solidifikasi) merupakan proses perubahan dari fasa cair menuju fasa padat yang terjadi saat pengecoran. Proses solidifikasi terjadi dalam dua tahap<sup>[44]</sup>, yaitu :

#### 1. Nukleasi

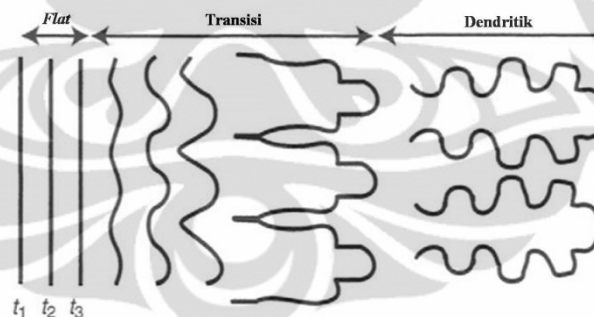
Proses pembekuan fasa padat dari cair selalu mensyaratkan adanya pembentukan permukaan baru yang memisahkan kedua fasa. Energi dibutuhkan untuk pembentukan permukaan baru ini. Oleh karena itu, energi permukaan berhubungan dengan antarmuka padatan-cairan. Analogi dari energi ini dihubungkan dengan permukaan batas butir dari fasa padat. Energi untuk pembentukan permukaan baru mensyaratkan bahwa cair mendingin di bawah temperatur pembekuan setimbang yang disebut *undercooled* sebelum pembekuan dimulai seperti diilustrasikan pada Gambar 2.5.



**Gambar 2.5.** Kurva pendinginan pada logam murni mengilustrasikan derajat *undercooling* yang dibutuhkan untuk mengawali proses pembekuan<sup>[47]</sup>.

Pembekuan akan terjadi lebih spontan jika derajat *undercooling*-nya besar. Derajat *undercooling* yang penting untuk pembekuan akan menurun dengan hadirnya permukaan-permukaan baru yang bertindak sebagai *nuclei* (inti) bagi kristal padat. Ketika logam cair dituang ke cetakan, dinding cetakan ini berfungsi sebagai inti awal untuk pembekuan. Gradien temperatur yang tinggi mengakibatkan pembentukan fasa padat yang lebih lanjut. Hal ini dapat menyebabkan antarmuka padatan-cairan menjadi tidak stabil dan *protrusion* (tonjolan padat) tumbuh di dalam fasa cair dengan laju yang lebih cepat dibandingkan dengan penyusunan dari antarmuka yang stabil. Laju pertumbuhan yang lebih cepat dari *protrusion* terjadi karena mereka dikelilingi oleh cairan logam yang lebih tinggi *undercooled*-nya.

Pertumbuhan *protrusion* yang sangat cepat dari antarmuka padatan-cairan menyebabkan transisi dari antarmuka *flat* menjadi struktur dendritik (lihat Gambar 2.6 dan 2.7). Dendrit tumbuh pada arah kristalografi tertentu yaitu  $\langle 100 \rangle$  untuk kristal *cubic* dan  $\langle 1010 \rangle$  untuk kristal heksagonal, dimana sebagai konsekuensinya lengan dendrit sekunder atau tersier sering terbentuk. Struktur dendrit tumbuh tegak lurus menjauhi cetakan membentuk butir *columnar* (lihat Gambar 2.10).



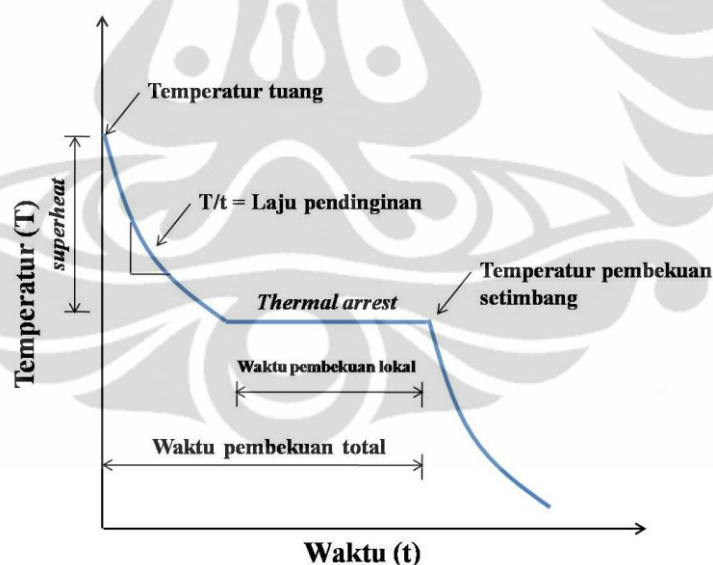
**Gambar 2.6.** Ilustrasi transisi dari *flat* ke struktur dendritik pada antarmuka cair-padat. Bagian kiri adalah permukaan cetakan.<sup>[47]</sup>



**Gambar 2.7.** Struktur butir produk cor batangan memperlihatkan kristal *chill* berbatasan dengan dinding cetakan, beberapa tumbuh menjadi butir *columnar*.<sup>[47]</sup>

Setelah proses nukleasi, maka material akan mencapai temperatur pembekuan kembali (*recallescences*) untuk proses pertumbuhan kristal. Proses nukleasi terjadi pada permukaan padatan yang sudah ada sebelumnya. Energi yang dibutuhkan untuk pembentukan permukaan *interface* yang sebagian ini tidak terlalu banyak, dibandingkan pada pembentukan permukaan *interface* awal yang berbentuk *complete spherical*. Hal ini bisa menjadi keuntungan dikarenakan pertumbuhan butir yang halus pada proses pengecoran memiliki properti yang lebih baik dibandingkan butir yang kasar.

Kurva pendinginan adalah faktor penting dalam mengontrol kualitas produk hasil pengecoran. Bagian terpenting dari kurva ini adalah kecepatan pendinginan yang akan mempengaruhi mikrostruktur dan sifat material. Area pada material yang membeku dengan cepat akan memiliki struktur butir yang lebih halus jika dibandingkan dengan area pada material yang membeku perlahan. Gambar 2.8 di bawah ini adalah contoh kurva pendinginan dari logam murni (tanpa unsur paduan)

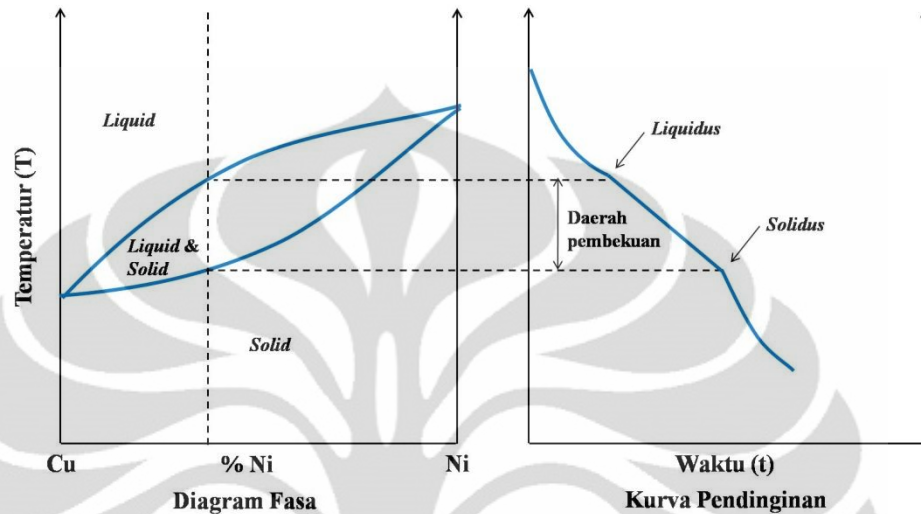


Gambar 2.8. Kurva pendinginan pada logam murni<sup>[44]</sup>.

Pada Gambar 2.8 dapat kita lihat bahwa sebelum *thermal arrest* material berada pada fasa cair, sedangkan pada saat *thermal arrest* material berubah dari fasa cair menjadi padat, semakin tinggi daerah *superheat* maka semakin lama waktu material untuk mengisi bentuk-bentuk yang detail pada cetakan.



Pada Gambar 2.8 diatas menunjukkan kurva pendinginan pada logam murni, namun pada kenyataannya kebanyakan logam yang dipakai dalam proses pengecoran berupa paduan, yang memiliki kurva pendinginan seperti yang ditunjukkan oleh kurva pendinginan paduan Cu-Ni pada Gambar 2.9 di bawah.



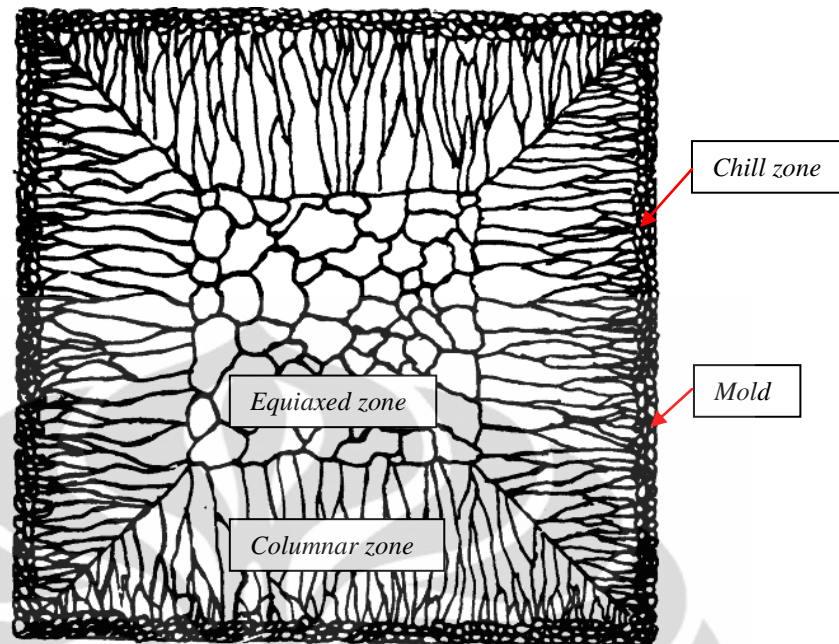
**Gambar 2.9.** Kurva pendinginan pada logam paduan<sup>[44]</sup>.

Dapat dilihat pada Gambar 2.9 bahwa kurva pendinginan tidak memiliki *thermal arrest* melainkan terdapat *freezing range* atau daerah pembekuan, yang menunjukkan bagian *liquidus* dan *solidus* yang ada pada diagram fasa dari masing-masing paduan logam.

## 2. Pertumbuhan kristal

Pertumbuhan butir pada saat proses solidifikasi terbagi menjadi tiga zona berbeda, yaitu *chill zone*, *columnar zone*, dan *equiaxed zone*. Pada Gambar 2.10 terlihat adanya tiga zona pada logam yang memiliki perbedaan bentuk butir yang terjadi. *Chill zone* merupakan daerah solidifikasi yang terjadi pada dinding cetakan, dimana panas yang terdapat pada produk diserap dengan cepat oleh cetakan, lalu semakin ke arah tengah, selanjutnya terbentuk *columnar zone*. Zona ini berbentuk ramping, dan panjang mengarah ke pusat cetakan yang memiliki temperatur yang masih tinggi. Pada bagian tengah produk, terdapat *equiaxed zone* yang berbentuk *spherical* dan berukuran lebih besar dibandingkan pada *chill zone*. Zona ini diharapkan terbentuk pada proses pengecoran dikarenakan memiliki sifat isotropi. Zona *equiaxed* dapat diperluas dengan cara menurunkan temperatur tuang, mengurangi inklusi, atau menggunakan *grain refinement*<sup>[44]</sup>.

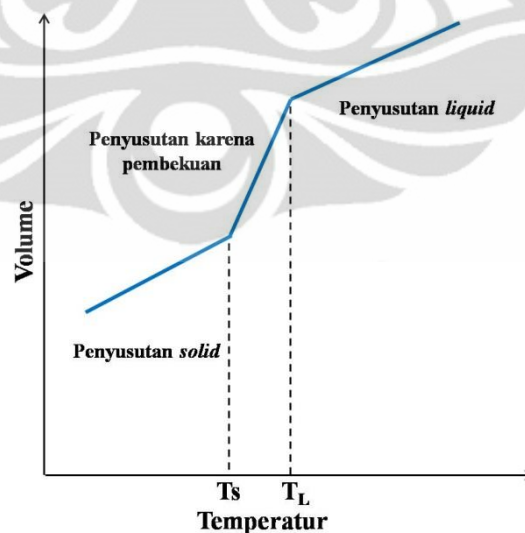




Gambar 2.10. Skema struktur butir coran<sup>[48]</sup>.

### 2.2.3 Penyusutan Volume karena Pembekuan

Ketika logam cor membeku dan mendingin, volumenya akan berkurang seperti ditunjukkan pada Gambar 2.11. Dimana terdapat tiga kontribusi utama pada penyusutan volume yaitu penyusutan cair, penyusutan karena pembekuan dan penyusutan padat. Banyaknya penyusutan volume pada beberapa logam ditunjukkan pada Tabel 2.8.

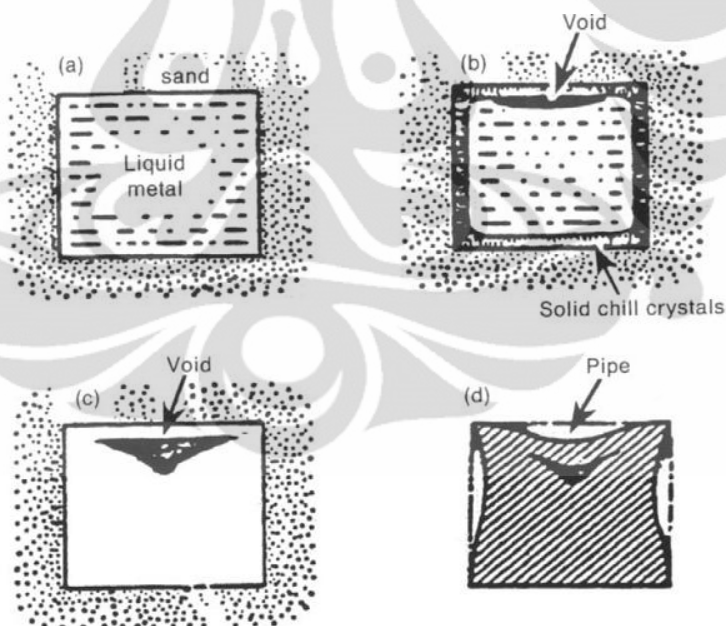


Gambar 2.11. Perubahan volume pada pembekuan paduan logam.<sup>[47]</sup>.

**Tabel 2.8.** Penyusutan pembekuan dan penyusutan padat untuk logam cor,<sup>[47]</sup>.

Logam	Penyusutan pembekuan (%)	Koefisien ekspansi termal, $\alpha$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Penyusutan padatan (%)
Paduan aluminium	7	$25 \times 10^{-4}$	6.7
Besi tuang	1.8	$13 \times 10^{-4}$	4
Baja	3	$14 \times 10^{-4}$	7.2
Paduan tembaga	5.5	$17 \times 10^{-4}$	6

Penyusutan cair bukan merupakan permasalahan pengecoran, selama tersedia logam yang cukup untuk mengisi *shrinkage cavity*. Efek dari penyusutan padat dan penyusutan karena pembekuan ditunjukkan dengan ilustrasi kubus *sand casting* pada Gambar 2.12. Pertama terbentuk kulit padat pada antarmuka padat-cair ketika mulai membeku (Gambar 2.12 (b)). Hal ini dengan efektif mengisolasi cair yang tersisa ke daerah tengah kubus. Ketika material membeku, terjadi penyusutan dan pembentukan *void* (Gambar 2.12 (c)) atau disebut dengan *macroporosity*. Pada pembekuan lebih lanjut dan pembekuan padat, menyebabkan distorsi dan pembentukan pipa pembekuan pada bagian atas kubus (Gambar 2.12 (d)).

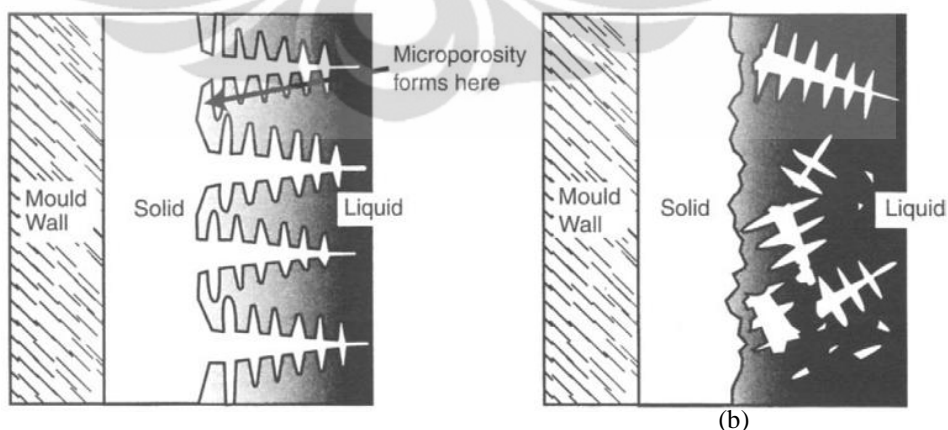
**Gambar 2.12.** Penyusutan terjadi selama *sand casting* pada kubus (lihat penjelasan pada *text*)<sup>[47]</sup>.

### 2.2.4 Cacat Pengecoran

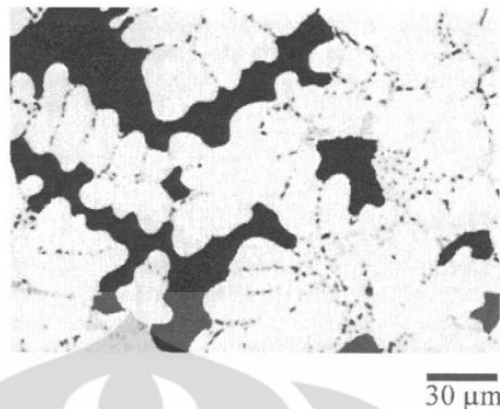
Pembentukan *macroporosity* sebagai akibat dari penyusutan selama pembekuan dan pendinginan telah diidentifikasi sebagai dampak dari proses pengecoran. Hal ini dapat diatasi dengan penyediaan logam yang cukup untuk mengisi *shrinkage cavity*. Dimana dalam industri biasanya dilakukan dengan pemberian *riser* yang tepat dan sesuai untuk menjaga bentuk produk cor. Beberapa karakteristik dari pembekuan logam dapat menyebabkan berbagai jenis cacat pengecoran yang akan dibahas pada butir 2.2.3 ini.

#### a. *Microporosity*

Percabangan dari *interface* dendritik menyebabkan pengisian logam cair di antara dendrit menjadi sulit. Gambar 2.13 (a) mengilustrasikan pembekuan pada struktur permukaan dendrit. Ketika logam diantara dendrit padat membeku dan mendingin, terjadi penyusutan kecuali terdapat tambahan logam cair yang dapat mengisi area *microporosity* yang terbentuk diantara dendrit atau *interdendritic* ini. Pada temperatur yang dikorespondensikan dengan *mushy zone* ini, kebanyakan logam cair dalam keadaan sangat *viscous*, sehingga umumnya sulit bagi logam cair untuk berpenetrasi ke dalam struktur dendrit yang kompleks, yang dapat menyebabkan meningkatnya jumlah *microporosity*. Berbeda dengan *macroporosity*, *microporosity* terjadi pada skala yang jauh lebih halus dan biasanya dalam bentuk yang tidak teratur seperti ditunjukkan pada Gambar 2.14.



**Gambar 2.13.** Diagram pembekuan struktur dendrit<sup>[47]</sup>. (a) Pertumbuhan dendrit yang mengakibatkan *microporosity* pada daerah *interdendritic*. (b) Pembekuan dendritik *equiaxed*.



**Gambar 2.14.** *Microporosity* (daerah hitam) di dalam paduan Al - 9 wt. % Si<sup>[47]</sup>.

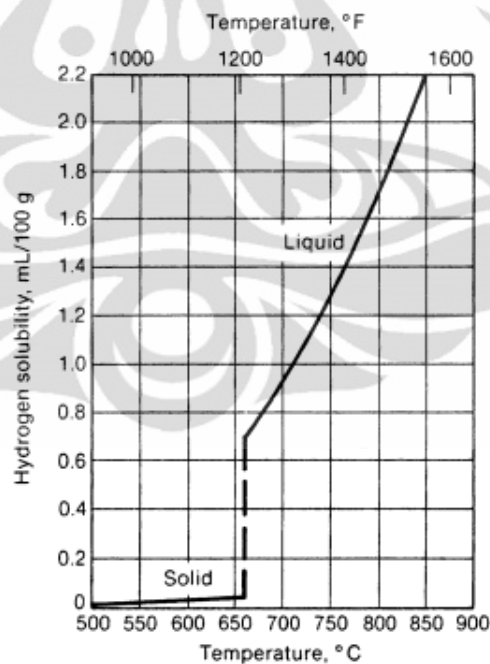
*Microporosity* dapat dihindari dengan meyakinkan kecepatan tuang ke dalam cetakan tinggi. Pada keadaan ini, gaya pada aliran logam cair melawan dan menghancurkan pertumbuhan dendrit sehingga mereka menjadi terorientasi secara acak seperti diilustrasikan pada Gambar 2.13 (b). Teknik ini akan menghasilkan pembentukan mikrostruktur dendrit yang *equiaxed*. Selain itu *microporosity* juga dapat dihindari dengan perubahan komposisi paduan sebagai contoh pengecoran pada komposisi eutektik. *Microporosity* menjadi permasalahan serius ketika lengan dendrit panjang yang dengan efektif dapat menghalangi aliran logam. Dendrit yang panjang terjadi ketika ketika paduan yang dicor memiliki *mushy zone* yang besar. Karena paduan eutektik membeku pada satu temperatur, tidak terdapat *mushy zone* dan *microporosity* dapat dikurangi. Namun pada paduan eutektik, kebanyakan porositas yang terjadi dalam bentuk *macroporosity* yang dapat lebih mudah ditangani dengan pemberian *riser* yang tepat. Karakteristik ini membuat manufaktur dari paduan eutektik menjadi lebih mudah. Namun demikian, umumnya sifat mekanik eutektik tidak cocok untuk kebanyakan aplikasi.

#### **b. Porositas Gas**

Porositas gas merupakan cacat yang diakibatkan pembentukan gelembung udara pada proses pengecoran pada saat didinginkan. Hal ini terjadi dikarenakan kebanyakan logam cair dapat menyimpan gas terlarut dalam jumlah besar, tetapi ketika dalam bentuk padatan logam tidak bisa menyimpan banyak gas terlarut, maka gelembung gas akan terperangkap di dalam logam hasil pengecoran<sup>[44]</sup>.

Porositas gas dapat terbentuk pada permukaan produk pengecoran atau terperangkap di dalam logam produk cor. Hal ini dapat menyebabkan meningkatnya resiko terjadinya *stress corrosion*. Nitrogen, oksigen, dan hidrogen adalah gas yang paling banyak menjadi penyebab pada kasus porositas gas<sup>[49]</sup>. Pada pengecoran logam aluminium, hidrogen adalah satu-satunya gas yang dapat terlarut dalam skala besar, yang dapat menyebabkan *hydrogen gas porosity*.

Aluminium dan paduannya sangat rentan terhadap absorpsi hidrogen dalam kondisi cair. Hidrogen merupakan satu-satunya gas yang memiliki kelarutan yang cukup besar pada aluminium cair dan paduannya. Kehadiran hidrogen dalam aluminium cair akan menimbulkan masalah yang mengarah pada terjadinya cacat porositas pada hasil coran. Penyerapan hidrogen pada aluminium cair pada saat terjadi kontak antara permukaan aluminium cair dengan uap air pada atmosfer sehingga air tereduksi dan menghasilkan hidrogen seperti ditunjukkan pada Persamaan 2.1<sup>[13]</sup>.



**Gambar 2.15.** Grafik kelarutan hidrogen pada aluminium<sup>[11]</sup>.

Seperti terlihat pada Gambar 2.15 diketahui bahwa kelarutan gas hidrogen akan meningkat secara eksponensial seiring dengan kenaikan temperatur. Selama pendinginan aluminium cair, hidrogen terlarut yang memiliki kelarutan rendah pada keadaan padat, akan mengendap dalam bentuk molekul, sehingga mengakibatkan pembentukan porositas. Upaya pengendalian hidrogen dalam aluminium cair dapat dilakukan dengan beberapa cara misalnya dengan meminimalisasi sumber hidrogen yang masuk ke aluminium cair seperti dari bahan material yang mengandung uap air, melakukan proses *fluxing* dengan optimal (seluruh permukaan aluminium cair dapat terlindungi dari kontak dengan atmosfer), serta dengan melakukan proses *degassing* yang baik untuk menghilangkan hidrogen terlarut dalam aluminium cair<sup>[50]</sup>.

Pada pengecoran dalam skala beberapa kilogram, biasanya ukuran diameter porositas berkisar antara 0.01 sampai 0.5 mm. Namun pada pengecoran berskala yang lebih besar, porositas bisa mencapai diameter 1 mm. Untuk menghindari porositas gas, material dapat dicairkan dalam keadaan vakum, dalam lingkungan dengan *low-solubility gases*, seperti argon atau karbon dioksida, atau dengan menggunakan *flux* yang mencegah permukaan logam bersentuhan langsung dengan udara. Untuk mengurangi kelarutan gas pada logam, temperatur *superheat* dapat ditahan pada kondisi rendah<sup>[44]</sup>.

Turbulensi yang timbul ketika logam dituangkan ke dalam cetakan juga dapat menyebabkan gas terperangkap dalam logam, maka biasanya cetakan di desain untuk meminimalisir turbulensi. Metode lainnya seperti *vacuum degassing*, *gas flushing*, dan presipitasi. Metode presipitasi menggunakan reaksi antara gas dengan elemen lainnya sehingga membuat gas menyatu dan mengapung ke atas permukaan logam, contohnya oksigen dapat dikeluarkan dari tembaga dengan cara menambahkan fosfor, aluminium atau silikon dapat ditambahkan ke dalam baja untuk mengeluarkan oksigen<sup>[44]</sup>.

Gelembung gas dalam bentuk kecil disebut porositas, namun gelembung gas yang memiliki skala lebih besar biasa disebut *blowholes* atau *blisters*<sup>[47]</sup>. Cacat seperti ini biasa terjadi karena gas terbawa ke dalam logam cair, asap dan uap air pada pengecoran dengan cetakan pasir, atau gas lainnya dari logam cair atau cetakan. Dengan rekayasa desain cetakan, dan preparasi logam cair yang baik dapat mengurangi kemungkinan terjadinya *blowholes*.

### 2.2.5 Homogenisasi

Homogenisasi pada material hasil pengecoran merupakan tahapan pertama dari siklus perlakuan panas. Homogenisasi memiliki tujuan untuk menghilangkan segregasi, dan meningkatkan *formability*<sup>[3]</sup>. Homogenisasi melibatkan pemanasan *billet* ke temperatur tinggi setelah proses pengecoran, sehingga paduan membentuk larutan homogen di dalam aluminium<sup>[4]</sup>.

Temperatur homogenisasi paduan Al-Zn-Mg-Cu biasanya dilakukan di bawah 470 °C, karena temperatur 480 °C dapat menyebabkan *overheating* pada paduan aluminium seri 7xxx<sup>[51]</sup>. Mondolfo<sup>[39]</sup> menyebutkan bahwa untuk paduan dengan kekuatan rendah sampai sedang temperatur homogenisasi 577-617 °C masih aman digunakan. Homogenisasi membutuhkan periode yang sangat lama, umumnya 15-20 jam agar proses homogenisasi paduan berlangsung efektif. Namun demikian waktu homogenisasi juga tergantung pada struktur *billet* setelah pengecoran. Material dengan struktur *chill* dan jarak lengan dendrit yang kecil hanya membutuhkan beberapa jam untuk melakukan proses homogenisasi, namun untuk *billet* besar minimal dibutuhkan waktu 24 jam<sup>[39]</sup>.

Laju difusi dan kelarutan logam tembaga, magnesium dan seng cukup tinggi sehingga dapat larut dalam aluminium dengan baik. Namun laju difusi dari besi, mangan, chromium, *zirconium*, dan beberapa logam lain sangat lambat dan kelarutannya pada temperatur homogenisasi juga sangat rendah, sehingga pergerakan atomnya menjadi terbatas. Melalui homogenisasi sejumlah *iron*, mangan dan logam lainnya dapat larut di atas batas kelarutannya sehingga melalui perlakuan ini nantinya dapat dihasilkan tidak hanya proses pelarutan namun juga presipitasi<sup>[39]</sup>.

Setelah homogenisasi, *billet* aluminium dicelup ke dalam air kemudian dibentuk melalui proses pengerolan atau ekstrusi. Paduan yang dihomogenisasi dengan baik tidak memerlukan temperatur *solution treatment* yang terlalu tinggi untuk mencapai batas kelarutan atom maksimumnya.

### 2.3 Proses Pengerolan Aluminium

Proses pembentukan merupakan proses perubahan bentuk logam melalui deformasi plastis, misalnya penempaan, ekstrusi, pengerolan (*rolling*), penekanan (*deep drawing*), dan penarikan (*wire drawing*). Proses ini melibatkan tegangan yang besar, yang harus melebihi tegangan luluh dari material yang diproses. Semua material logam yang akan mengalami proses pembentukan harus memiliki keuletan yang tinggi, sehingga tidak retak atau pecah pada saat proses berlangsung<sup>[43]</sup>.

Pengerolan merupakan proses perubahan bentuk logam secara plastis, dimana ketebalan dari benda kerja direduksi dengan menggunakan gaya tekan dari dua buah rol atau lebih. Rol berputar (Gambar 2.16 (a)) untuk menarik dan menekan secara simultan benda kerja yang berada di antaranya. Proses tersebut dinamakan *flat rolling* yang digunakan untuk mereduksi ketebalan dari sebuah luas penampang segi-empat. Pada sisi *entry zone*, permukaan rol bergerak lebih cepat dari *work piece*-nya, dan pada sisi *exit zone* *work piece*-nya bergerak lebih cepat. Hal ini menyebabkan friksi, sehingga ditentukan titik netral, N (lihat Gambar 2.16 (b)). Dalam aplikasinya *flat rolling* banyak digunakan dalam pembuatan lembaran. Besarnya reduksi yang dilakukan secara sederhana dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.2.

$$\% \text{ red} = \frac{h_0 - h_f}{h_0} \times 100 \% \quad (2.2)$$

% red = % reduksi.

$h_0$  = tebal awal.

$h_f$  = tebal akhir.



Perbedaan ketebalan dinyatakan sebagai selisih antara ketebalan awal dan ketebalan akhir seperti ditunjukkan pada Persamaan 2.3. Dimana selanjutnya perbedaan ketebalan maksimum dapat dihitung melalui Persamaan 2.4 yang berhubungan dengan koefisien friksi ( $\mu$ ) dan jari-jari rol ( $R$ )<sup>[52]</sup>.

$$\Delta h = h_0 - h_f \quad (2.3)$$

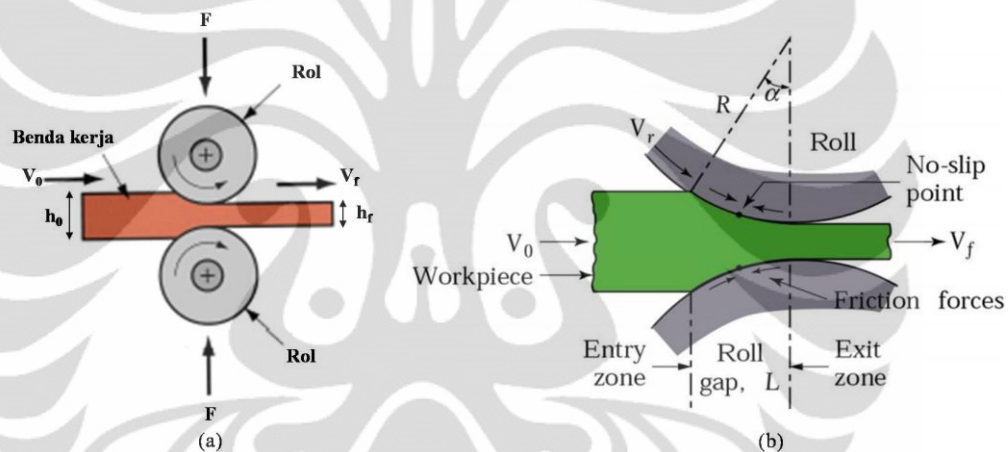
$\Delta h = \text{draft}$  (perbedaan tebal).

$$\Delta h_{max} = \mu^2 R \quad (2.4)$$

$\Delta h_{max} = \text{draft maximum}$  (perbedaan tebal maksimum).

$\mu$  = koefisien friksi.

$R$  = jari-jari rol.



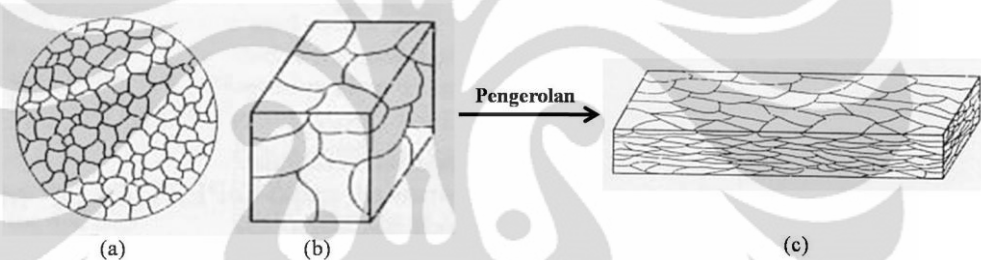
**Gambar 2.16.** Skema proses pengerolan. (a) Ilustrasi proses<sup>[47]</sup>. (b) Ilustrasi gaya yang bekerja<sup>[52]</sup>.

Sehingga dapat disimpulkan parameter proses pengerolan yang perlu diperhatikan diantaranya sebagai berikut:

- Diameter rol.
- Hambatan deformasi logam yang tergantung pada struktur metalurgi, temperatur, dan laju regangan.
- Gesekan antara rol dengan benda kerja.
- Adanya tegangan tarik ke depan atau ke belakang pada bidang lembaran.

### 2.3.1 Pengerolan Dingin pada Aluminium

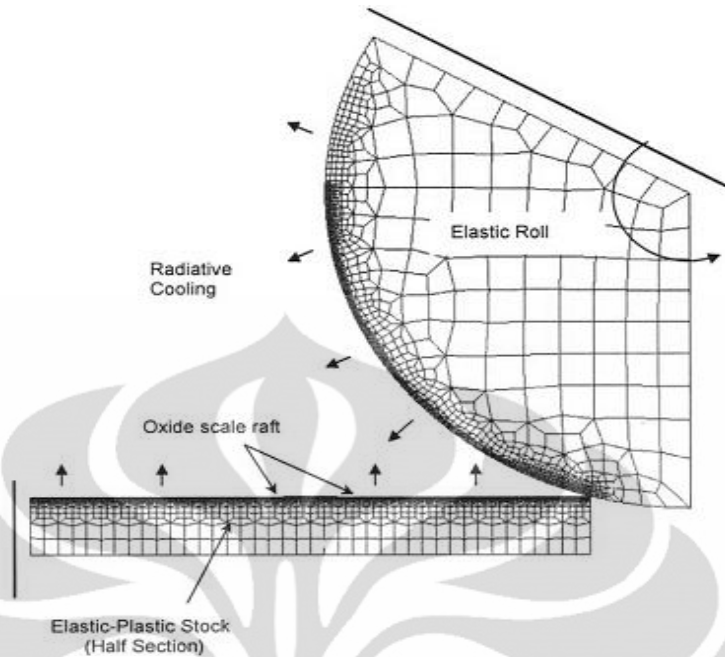
Logam yang digiling, diekstrusi atau ditarik dibawah temperatur rekristalisasinya ( $T/T_m < 0.3$ ) dikatakan telah mengalami pengerjaan dingin (*cold working*)<sup>[47]</sup>. Logam pada umumnya mengalami pengerjaan dingin pada temperatur ruang, meskipun perlakuan tersebut tetap menyebabkan kenaikan temperatur. Pada pengerjaan dingin diperlukan gaya yang lebih besar, akan tetapi sifat mekanis logam meningkat dengan signifikan. Logam tersusun dari butir yang jika berada dalam kondisi tak terbebani maka butir ini akan berbentuk *equiaxed* (Gambar 2.17 (a)) dan strukturnya akan *isotropic* (Gambar 2.17 (b)). Sampel logam yang telah dilakukan proses deformasi dingin akan menjadi keras dan *brittle*. Butir-butirnya akan menjadi *elongated* dan akan terdapat derajat anisotropi yang cukup besar (Gambar 2.17 (c)).



**Gambar 2.17.** Struktur butir sebelum dan sesudah pengerolan dingin. (a) *Equiaxed*. (b) *Isotropi*. (c) *Elongated*<sup>[53]</sup>.

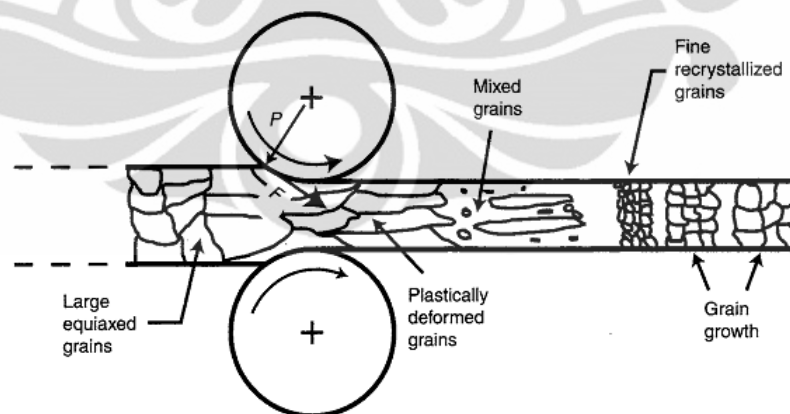
### 2.3.2 Pengerolan Panas pada Aluminium

Pada proses pembentukan panas ( $T/T_m > 0.6$ ), karena ada bantuan temperatur, logam dapat dideformasi lebih besar, dan tegangan yang diperlukan relatif lebih rendah di bandingkan pada proses pembentukan dingin. Namun demikian, pada proses ini mudah terbentuk lapisan oksida (kerak) di permukaan logam yang diproses seperti ditunjukkan pada Gambar 2.18. Pada kondisi yang lebih ekstrim rekasi-reaksi kimia yang terjadi dapat berpengaruh pula pada struktur dan karakteristik produk. Kerugian lain yang sangat signifikan misalnya adalah toleransi dimensi yang kurang baik serta buruknya penampakan permukaan<sup>[54]</sup>. Klasifikasi lain dari proses *rolling* yaitu pengerjaan yang dilakukan diantara kedua temperatur tersebut atau pengerjaan hangat (*warm working*)<sup>[55]</sup>, dimana nilai  $T/T_m$  berada diantara 0.3-0.6.



**Gambar 2.18.** Skematik representatif bagian makro dari model *finite element* untuk analisis pembentukan oksida pada proses pengerolan panas<sup>[56]</sup>.

Mikrostruktur rekristalisasi terjadi selama pembentukan dengan *hot rolling* (lihat Gambar 2.19). Hal ini dikarenakan adanya rekristalisasi dinamik yang terjadi secara simultan selama peningkatan temperatur pada pengerolan panas. Pengerolan panas yang dilakukan oleh E. Di Russo, *et al.* pada aluminium paduan 7075 dengan tebal awal 10 mm dapat dilihat pada Tabel 2.9.



**Gambar 2.19.** Skema struktur butir sebelum dan sesudah pengerolan panas<sup>[47]</sup>.

**Tabel 2.9.** Prosedur pengerolan panas pelat aluminium 7075 dengan tebal 10 mm<sup>[57]</sup>.

Proses	Proses					
	A	B	C	D	E	F
Prosedur						
<i>Thickness of the as-cast ingot sample</i>	~ 35 mm	~ 35 mm	~ 35 mm	~ 35 mm	~ 35 mm	~ 35 mm
<i>Homogenization of the ingot sample</i> (°)	450 °C x 8 h + 480 °C x 24 h	400 °C x 24 h	400 °C x 10 or 24 h	400 °C x 10 h	400 °C x 10 h	450 °C x 8 h + 480 °C x 24 h
<i>Plastic preheating</i>	430 °C x 1-2 h	330 °C x 1-2 h	330 °C x 1-2 h	250 °C x 1-2 h	250 °C x 1-2 h or 330 °C x 1-2 h	250 °C x 1-2 h
<i>Plastic working</i>	<i>Hot rolling at</i> (*) 430 °C - 390 °C	(***) <i>Continuous warm rolling at</i> 330 °C (°°)	<i>Continuous warm rolling at</i> 330 °C (°°)	<i>Continuous warm forging at</i> 250 °C (°°)	<i>Continuous warm forging at</i> 250 °C or 330 °C (°°)	<i>Continuous warm forging at</i> 250 °C (°°)
<i>Intermediate / final thickness</i>	~ 10 mm (r.t. (**)) = 72 %	~ 10 mm (r.t. = 72 %)	~ 15 mm (r.t. = 57 %)	~ 15 mm (r.t. = 57 %)	~ 23 mm (r.t. = 70 %)	~ 23 mm (r.t. = 70 %)
<i>Recrystallization treatment (in salt bath)</i> (°°°)	-	475 °C x 1-2 h	475 °C x 1-2 h	475 °C x 1-2 h	475 °C x 1-2 h	475 °C x 1-2 h
<i>Homogenization treatment (in air circulating furnace)</i> (°°°)	-	480 °C x 24 h	480 °C x 24 h	480 °C x 24 h	480 °C x 24 h	480 °C x 24 h
<i>Plastic preheating</i>	-	-	430 °C x 1 h	430 °C x 1 h	430 °C x 1 h (°°°°)	430 °C x 1 h (°°°°)
<i>Plastic working</i>	-	-	<i>Hot rolling at</i> 430 °C - 390 °C	<i>Hot rolling at</i> 430 °C - 390 °C	<i>Hot rolling at</i> 430 °C - 390 °C	<i>Hot rolling at</i> 430 °C - 390 °C
<i>Final thickness</i>	~ 10 mm	~ 10 mm	~ 10 mm (r.t. = 34 %)	~ 10 mm (r.t. = 34 %)	~ 10 mm (r.t. = 57 %)	~ 10 mm (r.t. = 57 %)

Notes : (°) –Followed by furnace cooling

(°°) –Cold water cooling of the pieces at the end of the plastic working

(°°°) – Followed by air cooling

(°°°°) – After machining of the pieces to 20 mm in thickness

(\*) – In some subsequent stages, with intermediate heating as the initial one

(\*\*) –r.t = reduction in thickness

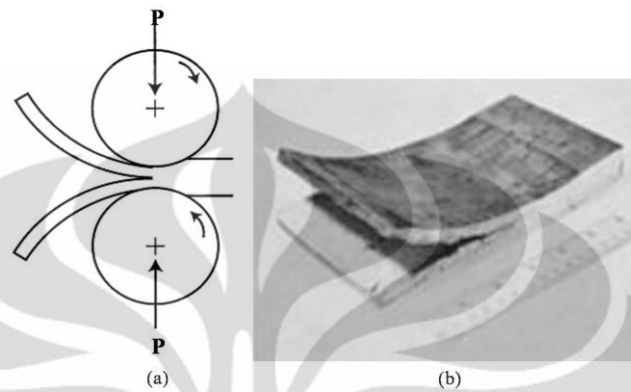
(\*\*\*) –Continuous warm rolling / forging: rolling & forging without an intermediate heating after the initial one

### 2.3.3 Cacat Pengerolan pada Aluminium

#### a. Alligatoring

Deformasi yang tidak seragam selama proses pengerolan dapat menyebabkan cacat *alligatoring* atau terkadang disebut *split ends*<sup>[47]</sup>. Dinamakan *alligatoring* karena pada cacat ini, pelat logam terbelah menjadi dua secara vertikal seperti bukaan mulut buaya. Ilustrasi dan contoh representatif dari cacat

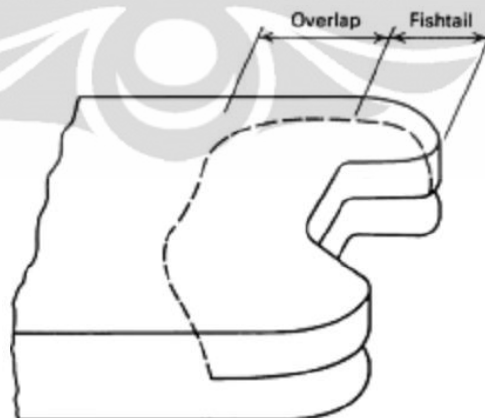
*alligatoring* ini dapat dilihat pada Gambar 2.20 (a) dan (b). Cacat ini harus dihindari karena bagian tebal dari pelat dapat merusak bagian tertentu dari *rolling mills*. *Alligatoring* juga dapat disebabkan dari aspek metalurgi seperti inklusi non-logam<sup>[58]</sup>.



**Gambar 2.20.** (a) Ilustrasi *alligatoring* yang dapat terjadi pada pengerolan dikarenakan deformasi yang tidak seragam<sup>[47]</sup>. (b) Contoh representatif cacat *alligatoring*<sup>[58]</sup>.

### b. *Overlap* dan *fishtail*

*Overlap* dan *fishtail* (lihat Gambar 2.21) merupakan cacat yang umum terjadi pada pengerolan *slab* dan pelat. *Overlap* terjadi karena tidak seragamnya deformasi pada ketebalan, sedangkan *fishtail* disebabkan oleh ketidakseragaman deformasi pada bagian lebar<sup>[58]</sup>. Kedua cacat ini perlu dipotong dan dijadikan *scrap* dalam industri. Cacat ini dapat dikurangi dengan desain yang sesuai pada rangkaian proses pengerolan.



**Gambar 2.21.** Skema *overlap* dan *fishtail* yang umum terjadi pada proses pengerolan<sup>[58]</sup>.

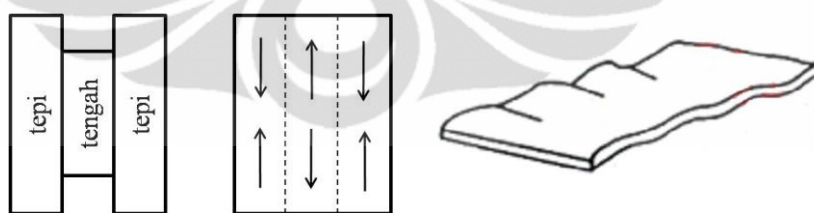
### c. *Wrinkling dan hairline crack*

Proses pengerolan lembaran bertujuan untuk mereduksi ketebalan dan meningkatkan sifat mekanis dari pelat logam tersebut. Proses deformasi dilakukan dengan menyiapkan skenario rangkaian proses pengerolan yang disesuaikan dengan karakteristik logam dan mesin rol yang digunakan. Reduksi yang terlalu berlebihan pada logam dapat menyebabkan cacat *wrinkle* atau pengerutan permukaan logam pada sisi lembaran bahkan setelah diputar 90° dari laluan terakhir dan jika tetap dilakukan deformasi nantinya dapat menimbulkan *hairline crack*.

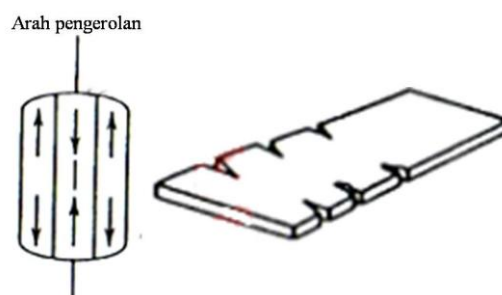
### d. *Wavy edge dan zippering*

Cacat pada proses pengerolan lainnya yang mungkin terjadi karena proses deformasi yang tidak sesuai adalah *wavy edge* dan *zippering*. Arah deformasi dalam setiap laluan diatur sedemikian rupa untuk mendapatkan hasil pengerolan yang sesuai. *Over rolling* dapat terjadi karena *profile* rol yang tidak sesuai atau variasi karakteristik dan bentuk dari setiap *strip* yang masuk. Cacat *wavy edge* dan *zippering* umumnya terjadi karena adanya *over rolling* pada lokasi tertentu.

Pada cacat *wavy edge* terjadi *over rolling* pada bagian tengah lembaran yang mengakibatkan permukaan logam menjadi bergelombang (lihat Gambar 2.22). Pada *zippering* terjadi *over lapping* di bagian tepi lembaran sehingga terdapat retak pada kedua sisi yang menyerupai bentuk *zipper* (lihat Gambar 2.23).



**Gambar 2.22.** Skema cacat *wavy edge* pada pengerolan logam lembaran<sup>[58]</sup>.



**Gambar 2.23.** Skema cacat *zippering* pada pengerolan logam lembaran<sup>[58]</sup>.

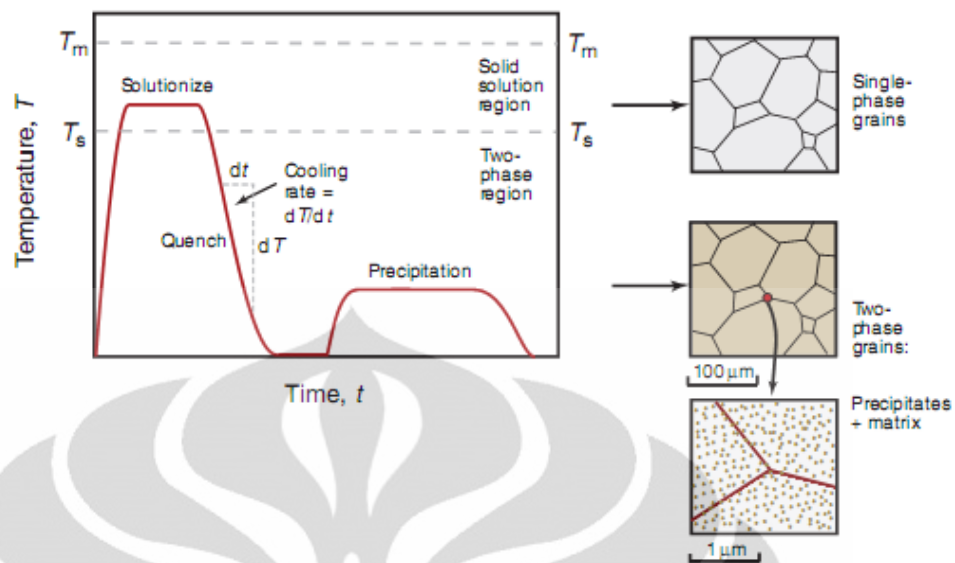
#### 2.4 Pengerasan Penuaan (*Age Hardening*) Paduan Aluminium

Produk pengecoran dari paduan aluminium dapat ditingkatkan sifat mekaniknya dengan perlakuan panas. Adapun tujuan utama dari proses perlakuan panas adalah:

- a. Menghasilkan sifat mekanik yang diinginkan.
- b. Menstabilkan sifat fisik, mekanik, maupun ketahanan korosi.
- c. Memastikan kestabilan dimensi selama pemakaian.
- d. Menghilangkan tegangan sisa yang disebabkan pendinginan tidak merata.

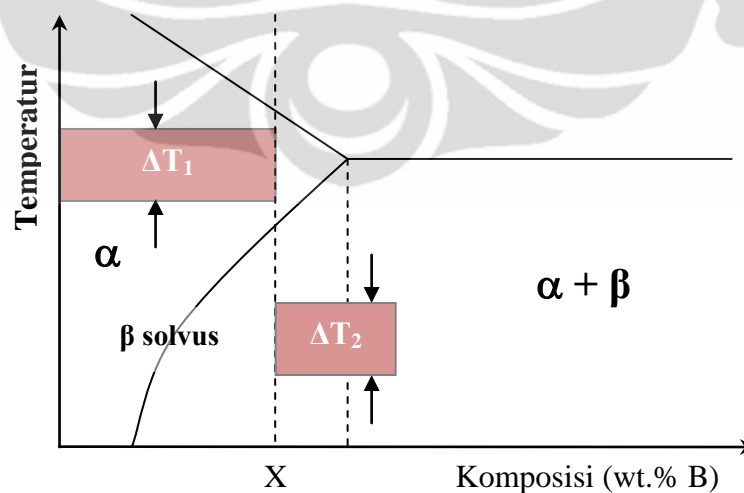
Mekanisme pengerasan yang sering dilakukan pada paduan aluminium adalah pengerasan presipitasi (*precipitation hardening*). Pengerasan tersebut memiliki prinsip utama, yaitu mekanisme penguatan melalui pembentukan endapan (presipitat) yang tersebar merata dalam paduan sehingga dapat menghalangi pergerakan dislokasi. Agar paduan dapat dikeraskan melalui metode ini, paduan harus mempunyai batas kelarutan maksimum dengan aluminium dan kelarutan tersebut menurun seiring dengan penurunan temperatur. Proses pengerasan presipitasi dapat dilihat pada Gambar 2.24 dan proses ini dilakukan melalui beberapa tahap<sup>[28]</sup>, yakni :

- a. *Solution treatment*, yaitu pemanasan paduan hingga mencapai daerah fasa tunggal sehingga tercipta larutan padat homogen.
- b. *Quenching*, yaitu pendinginan cepat untuk menghasilkan larutan padat lewat jenuh atau SSSS (*Super Saturated Solid Solution*).
- c. *Ageing*, yaitu penuaan pada temperatur dan jangka waktu tertentu.



**Gambar 2.24.** Skema perlakuan panas yang menghasilkan *precipitation hardening*. Skema ini juga menggambarkan perubahan struktur mikro yang terjadi selama proses<sup>[59]</sup>.

Prinsip mekanisme penguatan penuaan pada paduan aluminium dapat dilakukan dengan mengacu pada dua hal seperti ditunjukkan pada Gambar 2.25. Prinsip pertama yaitu adanya batas kelarutan maksimum dari satu komponen atau unsur terhadap komponen atau unsur yang lain. Prinsip kedua adalah adanya batas kelarutan komponen terlarut yang menurun secara drastis terhadap konsentrasi dari komponen pelarut atau komponen mayoritas paduan seiring dengan penurunan temperatur<sup>[28]</sup>.



**Gambar 2.25.** Diagram fasa yang mendeskripsikan prinsip penguatan penuaan.



### 2.4.1 *Solution Treatment*

Proses *solution treatment* merupakan tahapan pertama dalam pengerasan presipitasi dimana dilakukan pemanasan paduan aluminium pada temperatur tertentu (daerah di antara  $T_m$  dan  $T_s$ , untuk memperoleh larutan padat yang homogen (fasa tunggal ( $\alpha$ )). Pemanasan yang dilakukan mencapai temperatur daerah fasa tunggal  $\alpha$  pada diagram fasa Gambar 2.25 dan ditahan dalam jangka waktu tertentu untuk meyakinkan semua paduan (fasa  $\beta$ ) larut sempurna.

Proses ini akan memisahkan endapan dan menghancurkan kumpulan atom (*cluster*) yang terdapat dalam paduan. Semua unsur penguat dalam paduan aluminium ini diharapkan larut secara sempurna. Proses ini juga akan menghasilkan *vacancy* (tempat atom kosong) yang nantinya akan berguna sebagai tempat terbentuknya endapan pada proses penuaan. Hasil dari proses *solution treatment* ini dikenal dengan nama larutan padat<sup>[60,61]</sup>.

Laju pemanasan hingga mencapai temperatur *solution treatment* tidaklah penting, kecuali terdapat lebih dari satu fasa yang tidak terlarut seperti yang terjadi pada paduan Al-Si-Cu-Mg dan Al-Zn-Cu-Mg. Pada kedua paduan tersebut proses perlakuan panas dengan bertahap diperlukan untuk mencegah pelelehan dari fasa yang memiliki titik lebur rendah<sup>[43]</sup>.

### 2.4.2 *Quenching*

Proses *quenching* adalah proses pendinginan cepat setelah *solution treatment* ke temperatur ruang agar larutan padat yang terbentuk berubah menjadi *super saturated solid solution* (SSSS). Proses ini dilakukan agar kondisi larut sempurna tetap dipertahankan.

Kecepatan pendinginan harus tinggi agar atom terlarut terperangkap dalam larutan padat dan jumlah *vacancy* tidak berkurang. Jika kecepatan pendinginannya rendah maka *vacancy* akan berpindah ke tempat yang tidak merata dan tidak teratur sehingga nantinya akan terbentuk endapan yang tidak homogen. Endapan yang tadinya diharapkan tersebar merata justru akan tumbuh di batas butir yang energinya rendah sehingga mekanisme penguatan tidak efektif. Air digunakan sebagai media *quench* untuk laju pendinginan sedang. Proses *quenching* menghasilkan *super saturated solid solution*, larutan padat super jenuh.

Kondisi *super saturated solid solution* ini sangat labil. Artinya jika tidak langsung dilakukan *treatment* selanjutnya maka akan ada kesempatan bagi atom-atom yang terperangkap untuk berdifusi sehingga kondisi *super saturated solid solution* menjadi hilang. Salah satu cara untuk menjaga kondisi *super saturated solid solution* adalah dengan menyimpannya di dalam nitrogen cair. Dalam kondisi yang sangat dingin tersebut, atom-atom akan berhenti berdifusi sehingga kondisi ini dapat terjaga<sup>[43]</sup>.

### 2.4.3 Artificial Ageing

Pemanasan material yang telah dicelup (*artificial ageing*) dapat mempercepat proses presipitasi pada paduan yang bersifat *heat treatable*<sup>[4]</sup>. Pada tahap ini paduan akan dipanaskan pada temperatur tertentu guna memberikan *driving force* pada atom-atom yang terperangkap di dalam matrik aluminium untuk keluar, lalu beraksi dengan atom lain membentuk senyawa intermetalik dan akhirnya mengendap sebagai presipitat dengan skala nanometer<sup>[43]</sup>.

Percepatan proses presipitasi tersebut tidak sepenuhnya akibat perubahan dalam laju reaksi. Perubahan struktur tergantung pada waktu dan temperatur. Pada umumnya, peningkatan kekuatan luluh yang terjadi selama *artificial ageing* meningkat lebih cepat daripada UTS. Hal itu menunjukkan bahwa paduan telah kehilangan keuletan dan ketangguhan. *Properties artificial ageing* (T6) lebih tinggi daripada *natural ageing* (T4), tetapi keuletannya berkurang. *Over ageing* dapat menurunkan kekuatan tarik dan meningkatkan ketahanan terhadap *Stress-Corrosion-Cracking* (SCC) serta ketahanan terhadap pertumbuhan retak fatik.

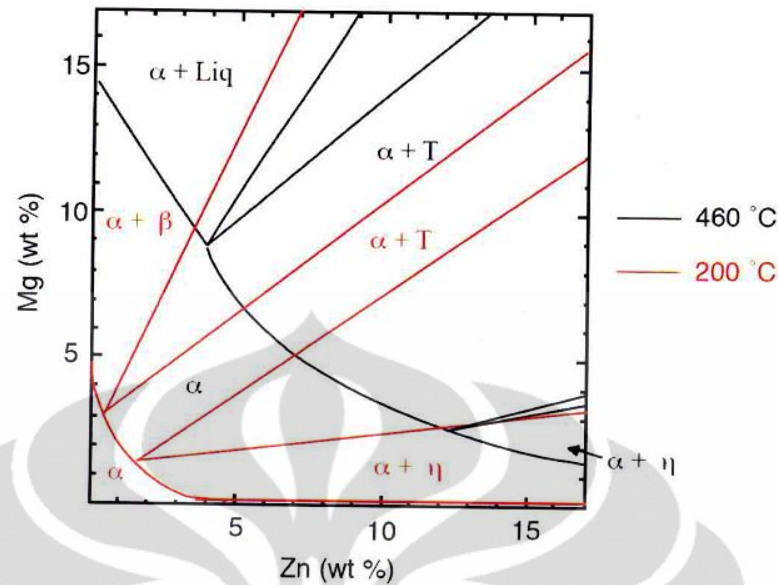
## 2.5 Fenomena Pengerasan Presipitasi Paduan Al-Zn-Mg-Cu

Seng dan magnesium merupakan elemen paduan utama dimana rasio Zn:Mg yang tinggi dapat menghasilkan kekuatan yang baik karena efek respons pengerasan presipitasi yang lebih tinggi bersamaan dengan efek *quench sensitivity* yang rendah<sup>[39]</sup>. Ketika paduan membentuk presipitat yang *non-hardenable* setelah pendinginan lambat, paduan dikatakan menjadi *quench sensitive*<sup>[62]</sup>. *Quench sensitivity* penting dalam pembentuk pelat tebal, seperti yang digunakan dalam industri penerbangan, karena bagian tengah bisa menjadi lebih lemah dibandingkan dengan bagian lainnya oleh pendinginan yang lebih

lambat<sup>[63]</sup>. Cu dapat meningkatkan *quench sensitivity* dan rasio Zn:Mg yang tinggi dapat menurunkan *quench sensitivity*. Oleh sebab itu *range* komposisi maksimum Cu pada paduan komersil aluminium seri 7xxx dibatasi 0-3 wt. %. Sedangkan rasio Mg:Zn terbaik dalam meningkatkan presipitasi dan kekerasan untuk pembentukan  $Mg_3Zn_3Al_2$  yaitu 1:1-1:2 dan  $MgZn_2$  adalah  $\sim 1:5$ <sup>[39]</sup>. Dimana  $Mg_3Zn_3Al_2$  merupakan presipitat utama yang menunjukkan ketahanan korosi terbaik pada kondisi natural *ageing*.

### 2.5.1 Diagram Fasa Keseimbangan Al-Zn-Mg

Karakterisasi mikrostruktur yang terbentuk pada paduan Al-Zn-Mg dapat diamati dan diprediksikan dengan menggunakan diagram fasa bersama dengan analisis data termal serta perhitungan *multi component* untuk pertumbuhan dendrit dan intermetalik oleh Alvarez, *et al*<sup>[64]</sup>. Menurut Mondolfo, seperti ditunjukkan Gambar 2.26 menghadirkan aluminium-rich pada di daerah sudut pada diagram fasa keseimbangan Al-Zn-Mg *isothermal* 460 °C dan 200 °C. Fasa tunggal  $\alpha$  membuat temperatur ini cocok untuk *solution treatment* seperti pada penelitian ini yang dilakukan pada temperatur 470 °C. Ketika dilakukan proses *ageing* yang dalam penelitian ini dilakukan pada temperatur 120 °C dan 190 °C, kehadiran fasa  $\alpha$  dan  $\eta$  diharapkan tetap ada dalam jumlah konstan sampai pendinginan pada temperatur ruang.



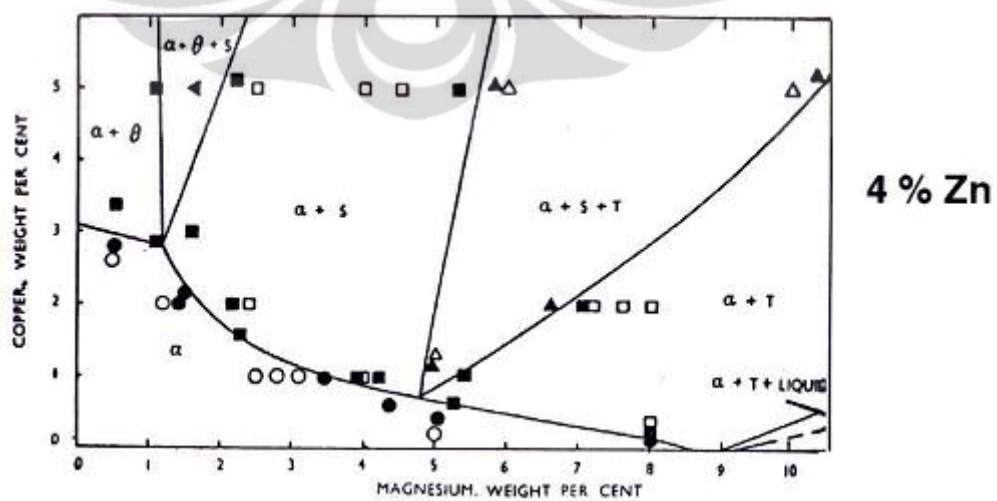
**Gambar 2.26.** Diagram fasa terner Al-Zn-Mg pada *isothermal* 460 dan 200 °C yang menunjukkan fasa aluminium-rich  $\alpha$  di daerah sudut<sup>[39]</sup>.

Fasa  $\eta$  mempunyai rumus stoikiometri kimia  $\text{MgZn}_2$ , struktur kristalnya heksagonal dengan parameter kisi  $a = 0.515\text{-}0.523$  nm dan  $c = 0.848\text{-}0.862$  nm. Presipitat yang terbentuk mungkin terjadi dalam sembilan orientasi berbeda berhubungan dengan matriks yang secara detail ditunjukkan pada Tabel 2.10<sup>[18]</sup>.

Gambar 2.27 merupakan diagram fasa quartener kesetimbangan *isothermal* pada 460 °C untuk paduan Al-Zn-Mg-Cu (Zn = 4 wt. %) yang menunjukkan bahwa penambahan Cu dapat menurunkan kelarutan Mg dalam  $\alpha$  larutan padat. Selain itu, pada diagram ini juga kita dapat melihat kehadiran fasa baru yaitu S dan  $\theta$  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 dapat dilihat pada Gambar 2.28. Dimana, pada Gambar 2.28 ini dapat diidentifikasi kehadiran fasa seperti  $\theta$  ( $\text{CuAl}_2$ ), S ( $\text{CuMgAl}_2$ ), T ( $\text{Mg}_3\text{Zn}_3\text{Al}_2$ ) dan  $\eta$  ( $\text{MgZn}_2$ ). Analisis perbandingan dari diagram fasa tersebut dapat memberikan gambaran kesimpulan bahwa kehadiran dari Cu dan peningkatan komposisinya dapat menaikkan fasa S, peningkatan Mg menaikkan fasa T dan peningkatan Zn menaikkan fasa  $\eta$ <sup>[18]</sup>.

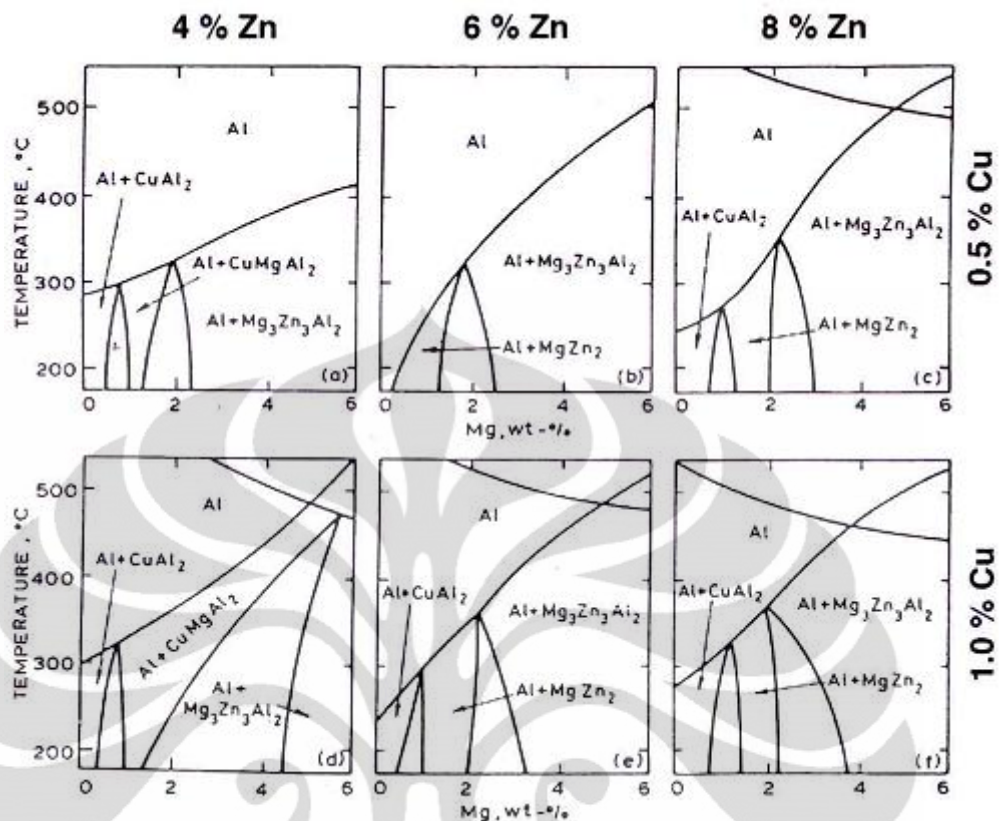
**Tabel 2.10.** Sembilan hubungan orientasi berbeda dan morfologi dari kesetimbangan fasa  $\eta$ <sup>[18]</sup>.

	Orientation relationship	Morphology
$\eta_1$	$(0001)_{\eta_1} \parallel (110)_{\alpha}; [10\bar{1}0]_{\eta_1} \parallel [001]_{\alpha}$	6- or 8-sided plates on $\{100\}_{\alpha}$ or rectangular plates on $\{100\}_{\alpha}$
$\eta_2$	$(0001)_{\eta_2} \parallel (1\bar{1}\bar{1})_{\alpha}; [10\bar{1}0]_{\eta_2} \parallel [110]_{\alpha}$	Hexagonal or rounded plates on $\{111\}_{\alpha}$
$\eta_3$	$(0001)_{\eta_3} \parallel (1\bar{1}\bar{1})_{\alpha}; [\bar{1}\bar{1}20]_{\eta_3} \parallel [110]_{\alpha}$	Hexagonal or triangular plates on $\{111\}_{\alpha}$
$\eta_4$	$(0001)_{\eta_4} \parallel (110)_{\alpha}; [\bar{1}2\bar{1}0]_{\eta_4} \parallel [1\bar{1}\bar{1}]_{\alpha}$	Rods or laths on $\{111\}_{\alpha}$ with the longest dimension parallel to $[0001]_{\eta}$ . For $\eta_4$ $[0001]_{\eta} \parallel \langle 110 \rangle_{\alpha}$ , for $\eta_5$ - $\eta_7$ $[0001]_{\eta}$ is rotated within $\{111\}_{\alpha}$ . When the precipitate density is high, the laths are constrained to a $\{111\}_{\alpha}$ plate-like morphology
$\eta_5$	$(30\bar{3}2)_{\eta_5} \parallel (110)_{\alpha}; [\bar{1}2\bar{1}0]_{\eta_5} \parallel [1\bar{1}\bar{1}]_{\alpha}$	
$\eta_6$	$(20\bar{2}1)_{\eta_6} \parallel (1\bar{1}2)_{\alpha}; [\bar{1}2\bar{1}0]_{\eta_6} \parallel [1\bar{1}\bar{1}]_{\alpha}$	
$\eta_7$	$(10\bar{1}4)_{\eta_7} \parallel (110)_{\alpha}; [\bar{1}2\bar{1}0]_{\eta_7} \parallel [1\bar{1}\bar{1}]_{\alpha}$	
$\eta_8$	$(\bar{1}2\bar{1}0)_{\eta_8} \parallel (1\bar{1}2)_{\alpha}; [0001]_{\eta_8} \parallel [31\bar{1}]_{\alpha}$	$\{112\}_{\alpha}$ rods
$\eta_9$	$(\bar{1}2\bar{1}0)_{\eta_9} \parallel (001)_{\alpha}; [0001]_{\eta_9} \parallel [110]_{\alpha}$	Needles along $\langle 110 \rangle_{\alpha}$



**Gambar 2.27.** Diagram fasa quartener Al-Zn-Mg-Cu pada *isothermal* 460 °C<sup>[18]</sup>.

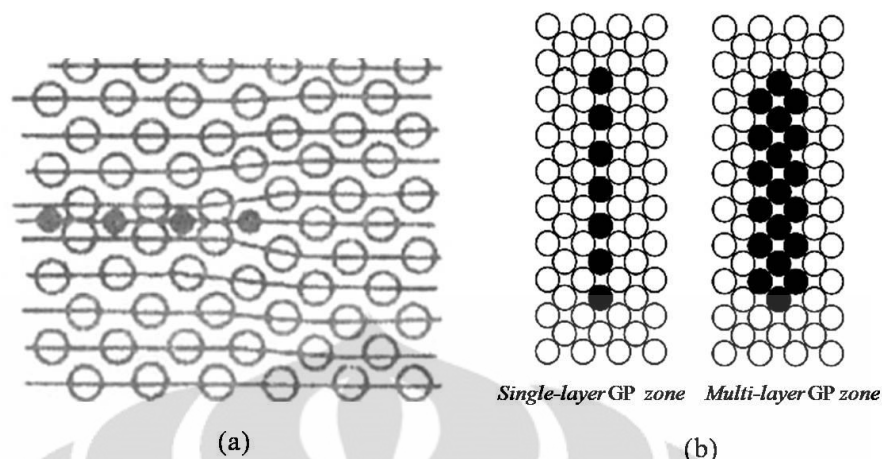




Gambar 2.28. Diagram fasa quartener Al-Zn-Mg-Cu yang menunjukkan kombinasi dari *solute* pada daerah temperatur tertentu<sup>[18]</sup>.

### 2.5.2 GP Zone dan Pengerasan Presipitasi

*GP zone* adalah susunan atom-atom unsur terlarut yang berdifusi keluar matriks dan membentuk susunan seperti lapisan tipis yang berada diantara atom aluminium pada lokasi-lokasi tertentu di dalam matriks<sup>[43]</sup> (Gambar 2.29 (a)). Struktur *GP zone* ini ditemukan oleh *Guinier-Preston*. Pembentukan struktur *GP zones* umumnya diikuti oleh presipitasi dari fasa transisi (*transition phases*) sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.29 (b). Struktur *GP zones* terbentuk sebagai presipitat awal selama proses penuaan pada temperatur rendah dari beberapa paduan aluminium penting. Pada pengerasan Al-Cu berbagai paduan Al-Cu pada temperatur 130 °C dan 190 °C (*Silcock et al.*) puncak kekerasan awal mengacu pada pembentukan *GP zones*. Struktur ini menunjukkan kestabilan hingga rentang temperatur 140-160 °C<sup>[48]</sup>. Morfologi dan kristalografi *GP zone* di dalam matriks paduan aluminium *age-hardenable* ditunjukkan pada Tabel 2.11.



**Gambar 2.29.** (a) Struktur GP zone<sup>[65]</sup>. (b) Struktur GP zone *single* dan *multi-layer*<sup>[66]</sup>.

**Tabel 2.11.** Morfologi dan kristalografi GP zone di dalam matriks pada paduan aluminium *age-hardenable*<sup>[6]</sup>.

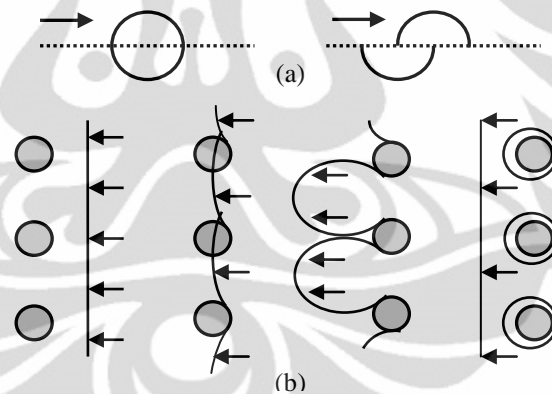
Paduan	GP zone	Fasa <i>intermediate</i>	Fasa stabil
Al-Cu	GP(1) zone : berbentuk <i>disk</i> dengan Cu berstruktur monolayer. GP(2) zone : berbentuk pelat dengan 2 layer Cu dipisahkan oleh 3 layer Al. GP (1) dan GP (2) zone terbentuk pada bidang {100} matriks Al.	$\theta'$ : Al <sub>2</sub> Cu Tetragonal, semi-koheren, terbentuk pada bidang {100} matriks Al.	$\theta$ : Al <sub>2</sub> Cu Tetragonal, inkoheren dan tidak beraturan.
Al-Cu-Mg	GPB zone : berbentuk jarum terelongasi di dalam arah <100> matriks Al	S' : Al <sub>2</sub> CuMg Ortorombik, semi-koheren, terbentuk pada bidang {210} di dalam arah <100> matriks Al	S : Al <sub>2</sub> CuMg Ortorombik, inkoheren.
Al-Mg-Si	GP zone : terbentuk pada bidang {100} matriks Al, mengandung Mg dan Si. Needle GP zone ( $\beta''$ ) : berbentuk jarum terelongasi di dalam arah <100> matriks Al, mengandung Mg dan Si.	$\beta'$ : Mg <sub>2</sub> Si Heksagonal, berbentuk batang terelongasi.	$\beta$ : Mg <sub>2</sub> Si Kubus dengan berbentuk pelat pada bidang {100} matriks Al inkoheren.
Al-Zn-Mg	GP zone : berbentuk bulat, mengandung Mg dan Zn.	$\eta'$ : MgZn <sub>2</sub> Heksagonal, berbentuk bulat / terelongasi. T' : Mg <sub>32</sub> (Al,Zn) <sub>49</sub> Heksagonal (terbentuk pada paduan dengan rasio Mg:Zn tinggi).	$\eta$ : MgZn <sub>2</sub> Heksagonal, inkoheren. T : Mg <sub>32</sub> (Al,Zn) <sub>49</sub> Heksagonal.
Al-Li	Struktur teratur dengan jenis LI <sub>2</sub>	$\delta'$ berbentuk bulat dengan Al <sub>3</sub> Li, memiliki struktur teratur berjenis LI <sub>2</sub> .	$\delta$ : AlLi Kubus, terbentuk pada batas butir, inkoheren.

Mekanisme pembentukan dan komposisi dari GP zone dan  $\eta'$  sudah diinvestigasi secara luas. Pada penelitian terkini Sha dan Cerezo<sup>[17]</sup> melaporkan adanya pembentukan *cluster* berdasarkan analisis yang didapatkan menggunakan teknik 3DAP. Mereka menemukan *cluster* kecil yang kaya akan Mg (atau GP-I zones) (< 30 atom *solute* dengan Zn/Mg = ~ 0.9) di dalam paduan Al-Zn-Mg-Cu sesudah *ageing* pada waktu singkat (sekitar 30 menit) pada temperatur 121 °C,

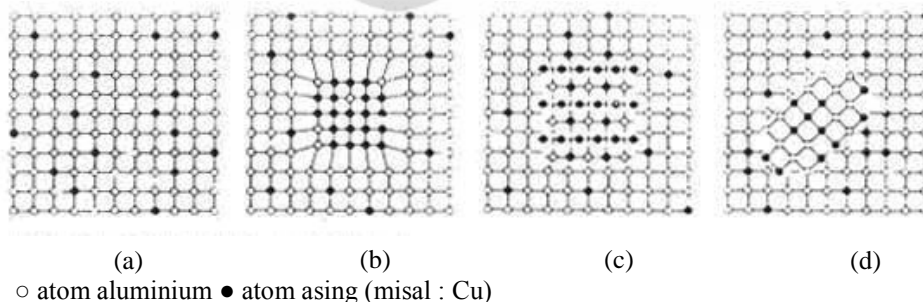
bersama dengan GP-I *zones* yang besar ( $Zn/Mg = 1.0$ ). Mereka juga menekankan bahwa mekanisme yang dominan untuk pembentukan  $\eta'$  merupakan transformasi dari GP-I *zones* yang kecil melalui *elongated cluster* dan bukan melalui nukleasi pada zona yang besar.

Presipitat yang memiliki struktur isomorf dengan matriks hingga koheren umumnya mengacu pada GP *zone*. Presipitat yang memiliki struktur kristal yang mampu dibedakan dari matriksnya mungkin akan membentuk daerah antarmuka dari interfasa yang koheren atau semi-koheren (lihat Gambar 2.31). Seluruh bentuk presipitat dapat menghalangi pergerakan dislokasi melalui mekanisme<sup>[67]</sup> sebagai berikut (lihat Gambar 2.30):

- Pergeseran dislokasi (*dislocation shearing*), dimana dislokasi bergerak dengan memotong atau menggeser kisi presipitat.
- Tekanan Orowan (*Orowan pressures*), dimana dislokasi bergerak dengan membentuk putaran (*looping*) di sekitar presipitat dan atau melampaui presipitat melalui mekanisme panjatan (*climb*).



**Gambar 2.30.** Mekanisme pergerakan dislokasi (a) pergeseran dislokasi; (b) tekanan Orowan.



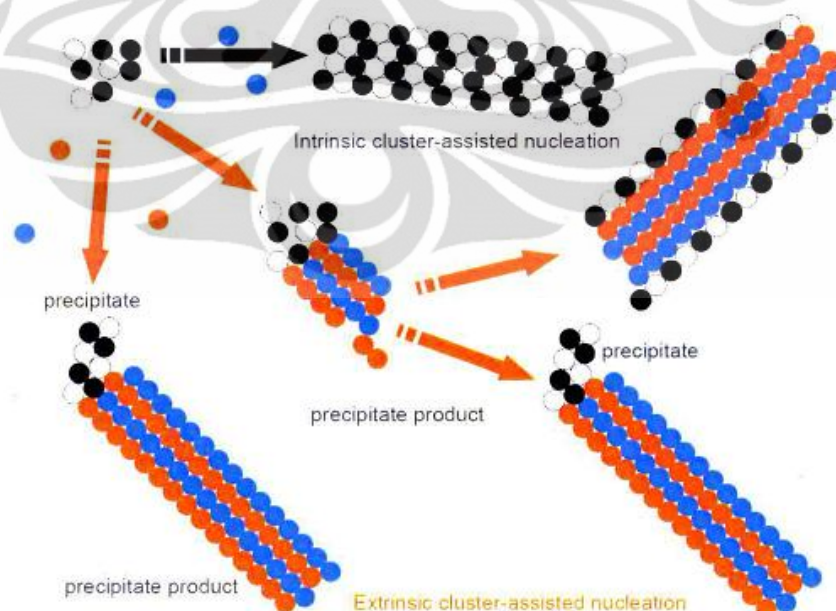
**Gambar 2.31.** Perubahan sifat koherensi presipitat pada proses *aging* untuk paduan aluminium (a) larutan padat dengan distribusi acak dari atom terlarut (b) presipitasi koheren (c) presipitasi semi koheren (d) presipitasi inkoheren<sup>[68]</sup>.



### 2.5.3 Clustering pada Paduan Al-Zn-Mg-Cu

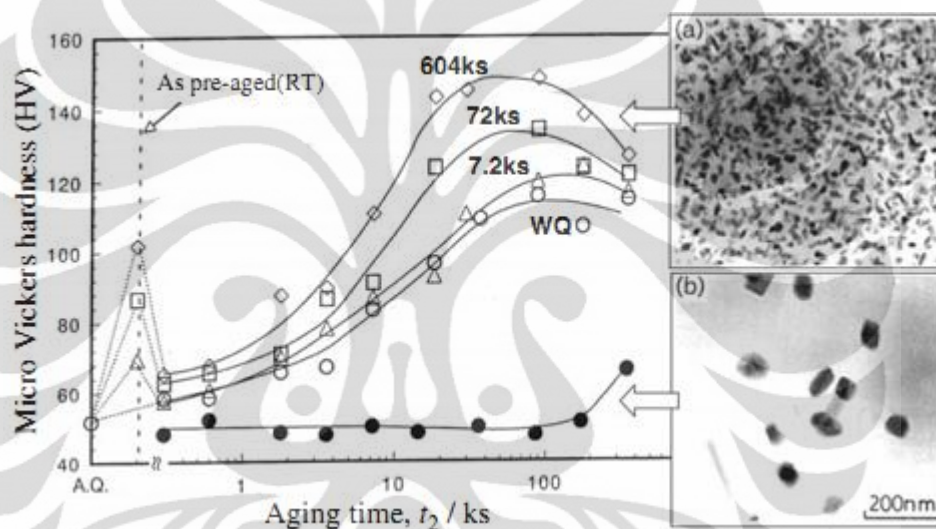
Ringer *et al.*<sup>[66]</sup> menyebutkan bahwa fenomena *rapid hardening* berhubungan dengan pembentukan *cluster* yang disebut dengan “*cluster hardening*”. Hal ini menjadi sangat penting untuk menjelaskan evolusi struktur tahap awal untuk meningkatkan kekuatan dan keuletan. Gang Sha dan Cerezo<sup>[17]</sup> mengemukakan bahwa pembentukan *cluster* paduan Al-Zn-Mg-Cu yang dihasilkan dari percobaannya menggunakan metode 3DAP (3 *Dimensional Atom Probe*). Pada sampel yang telah dicelup 1.5 jam pada temperatur ruang, mereka menemukan 14 *cluster* kecil dengan 10-30 atom padat pada setiap *cluster*. Selanjutnya perkembangan *cluster* yang ditemukan selama 24 jam *ageing* pada temperatur 121 °C berupa *blocky cluster*.

Gambar 2.32 mengilustrasikan proses *clustering* pada paduan aluminium. Terdapat dua mekanisme interaksi primer dalam pembentukan nukleasi melalui *cluster*, yaitu mekanisme *extrinsic* dan *intrinsic*. Reaksi *extrinsic* terjadi ketika *cluster* yang menginisiasi nukleasi tidak menjadi unsur pokok inti fasa sebagai contoh Mg-Ag *co-cluster* yang mempengaruhi pembentukan inti fasa  $\Omega$  pada paduan Al-Cu-Mg-Si-Ag. Reaksi *intrinsic* terjadi pada paduan yang sama dengan Mg-Ag *co-cluster* yang membantu pembentukan inti fasa X’.



**Gambar 2.32.** Skematik *cluster* yang membantu pembentukan inti. *Cluster* dengan atom hitam dan putih terlihat membantu pembentukan inti secara *intrinsic* pada bagian atas presipitat, reaksi *extrinsic* ditunjukkan dengan atom berwarna biru dan orange<sup>[18]</sup>.

Gambar 2.33 menunjukkan kurva *age-hardening* pada temperatur 150 °C dengan *micrograph* TEM dari paduan Al-Zn-Mg-Cu. Dengan meningkatkan waktu *ageing* pada temperatur ruang (sebagai *pre-ageing*) dapat meningkatkan *peak hardness* dibandingkan dengan *ageing* tunggal pada temperatur 150 °C setelah *water quenching* (WQ). Hal ini disebabkan pada *direct quenching* (DQ) terbentuk presipitat kasar  $\eta'$ , sedangkan dua tahap *ageing* akan menghasilkan presipitat  $\eta'$  yang lebih halus seperti ditunjukkan pada *micrograph* TEM. Sehingga jelas bahwa *cluster* kecil dan GP *zone* berperan efektif dalam pembentukan presipitat  $\eta'$  yang halus dan meningkatkan *age hardening*<sup>[6]</sup>.



**Gambar 2.33.** Kurva *age-hardening* dengan variasi waktu *ageing* untuk paduan Al - 5 % Zn - 2 % Mg (mass %) pada temperatur 150 °C setelah *direct quenching* (DQ), *water quenching* (WQ) dan *pre-ageing* pada temperatur ruang. *Micrograph* TEM mengindikasikan bahwa dua tahap *ageing* pada temperatur ruang menghasilkan presipitat halus (a) sedangkan DQ menghasilkan presipitat kasar (b)<sup>[6]</sup>.

#### 2.5.4 Rapid Hardening

*Rapid hardening* merupakan fenomena pengerasan paduan aluminium pada saat-saat awal perlakuan panas. Fenomena ini dipercaya terjadi karena adanya *cluster* paduan aluminium yang terbentuk di awal *ageing* setelah *solution treatment* dan *quenching*. Pengerasan yang terjadi dalam mekanisme ini cukup signifikan dimana dapat terlihat dari kemiringan peningkatan kekerasan setelah *ageing* (grafik kekerasan v.s waktu *ageing*) pada tahap-tahap awal.

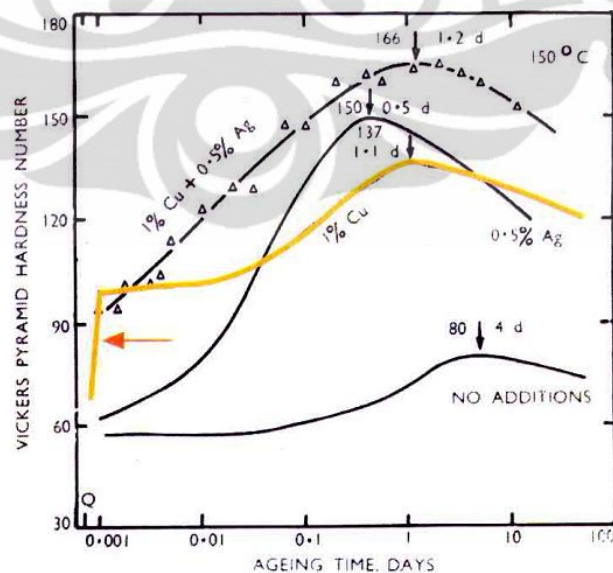
Penambahan sedikit Cu dapat mengubah mikrostruktur dan dekomposisi kinetik dari paduan Al-Zn-Mg-Cu<sup>[18]</sup>. Dalam *thesis*-nya Liddicoat mengutip penelitian Marsubara dan Cohen (1983) yang menyebutkan dua reaksi yang mungkin untuk pembentukan presipitat yaitu reaksi  $\gamma$  dan reaksi  $\delta$ .



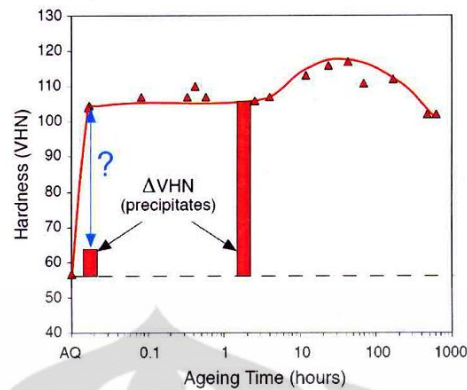
Reaksi  $\delta$  dikonfirmasi terjadi pada paduan Al-Cu-Mg (seri 2000) yang terjadi selama *ageing* pada 190 °C, dimana terdapat kehadiran GPB *zones* dan fasa S. Pada temperatur *ageing* rendah-moderate (20-165 °C), proses presipitasi mengikuti persamaan reaksi  $\gamma$ . Namun dalam penelitian Liddicoat<sup>[18]</sup>, studi *ageing* paduan Al-2.0Zn-1.8Mg-0.7Cu (at. %) tidak ditemukan bukti keberadaan GP *zones*, sehingga rangkaian presipitasi mengikuti persamaan  $\beta$ .



Penambahan sedikit elemen Cu (< 1 at. %) dapat secara dramatis menurunkan waktu inkubasi presipitat dan menyebabkan reaksi *rapid hardening*, fenomena yang umum terjadi pada paduan aluminium seri 2000 dan 7000 (lihat Gambar 2.34 dan 2.35). Namun demikian bagaimana Cu dapat meningkatkan kinetik dan kekerasan pada kondisi ini belum didefinisikan secara pasti. *Cluster hardening* disebut sebagai penyebab dari peningkatan sifat yang terjadi.



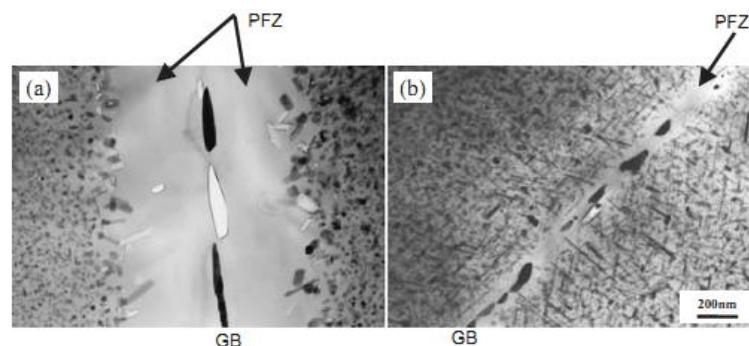
**Gambar 2.34.** Pengaruh dari Cu (kurva orange) pada kekerasan Al-4Zn-3Mg (wt. %) selama *ageing* pada temperatur 150 °C<sup>[18]</sup>.



**Gambar 2.35.** Reaksi *early rapid hardening* selama *ageing* paduan Al-Zn-Mg-Cu pada temperatur 150 °C.  $\Delta VHN$  yang ditampilkan dikalkulasikan dari presipitat yang dideteksi dengan TEM<sup>[18]</sup>.

### 2.5.5 Ductility dan PFZ yang Dikontrol oleh Nanocluster<sup>[6]</sup>

*Ductility* dari paduan dipengaruhi oleh *precipitate-free zone* (PFZ) di dekat batas butir. Peningkatan kekuatan dan *ductility* pada dasarnya dipengaruhi oleh pengurangan area PFZ. Gambar 2.36 menunjukkan *micrograph* TEM dari paduan Al-Zn-Mg dan Al-Zn-Mg-Ag setelah *ageing* pada temperatur 160 °C selama 86.4 ks. Terlihat jelas bahwa lebar area PFZ berkurang dengan penambahan Ag. Ukuran dari batas butir presipitat juga berkurang dengan adanya penambahan Ag. Temperatur *ageing* yang rendah juga efektif untuk pengurangan lebar dari PFZ. Mekanisme detail dari pengurangan lebar PFZ atau hilangnya PFZ belum dapat dijelaskan secara pasti. Profil distribusi dari atom *solute* dan *quench* yang memerangkap *vacancies* diasumsikan dapat mempengaruhi nukleasi dan pertumbuhan dari presipitat. *Microalloying* elemen Ag diharapkan dapat meningkatkan pembentukan *nanocluster* yang mempercepat nukleasi presipitat di dekat batas butir. *Nanocluster* diasumsikan berguna untuk mengontrol PFZ dan batas butir presipitat.



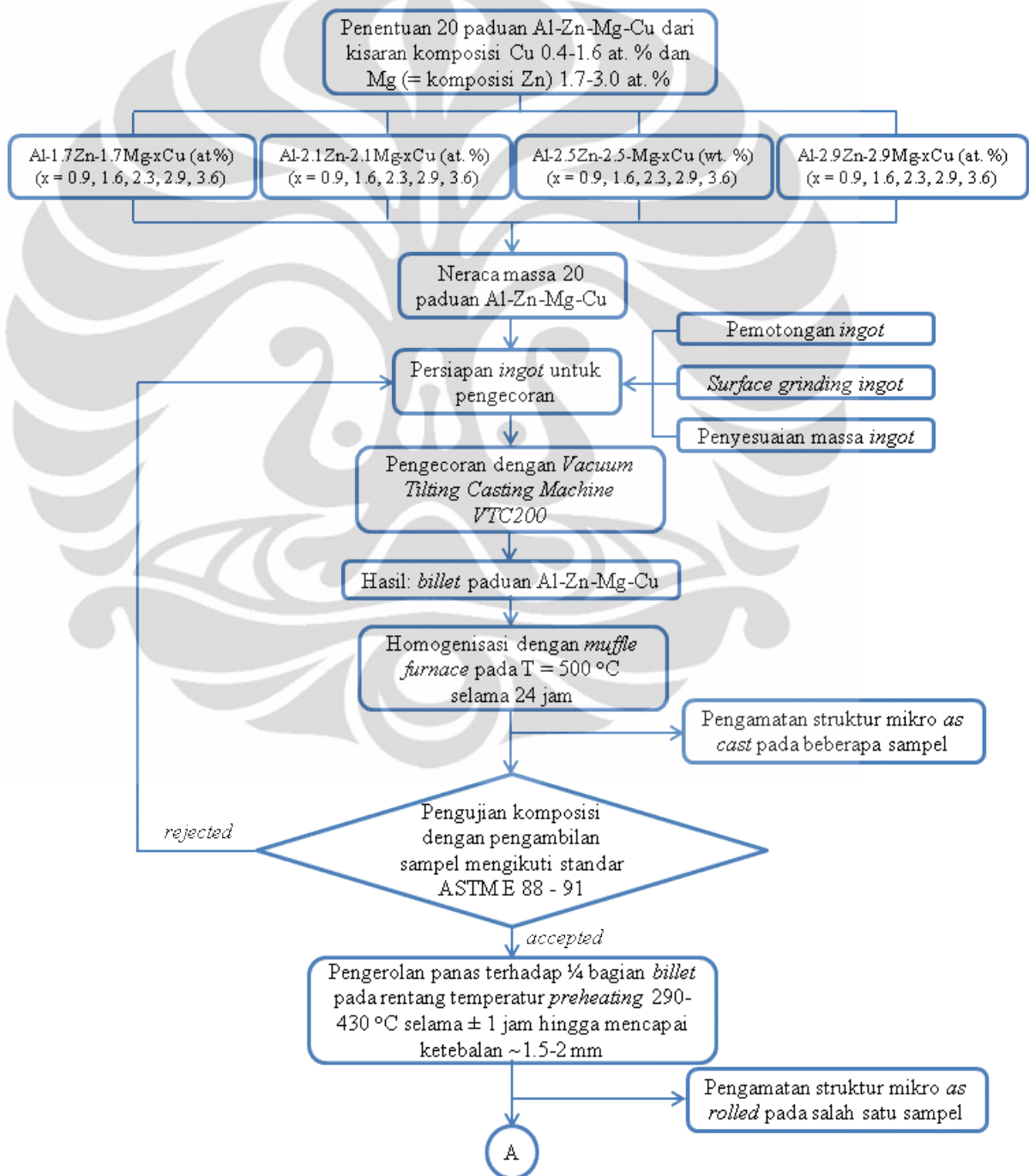
**Gambar 2.36.** *Micrograph* TEM yang menunjukkan *precipitate-free zone* (PFZ) di dalam paduan Al - 4.9 % Zn - 1.8 % Mg dan Ag-yang ditambahkan (0.3 %) (*mass %*) setelah *ageing* pada 160 °C selama 86.4 ks. Elemen *microalloying* Ag efektif untuk pengurangan lebar PFZ<sup>[6]</sup>.

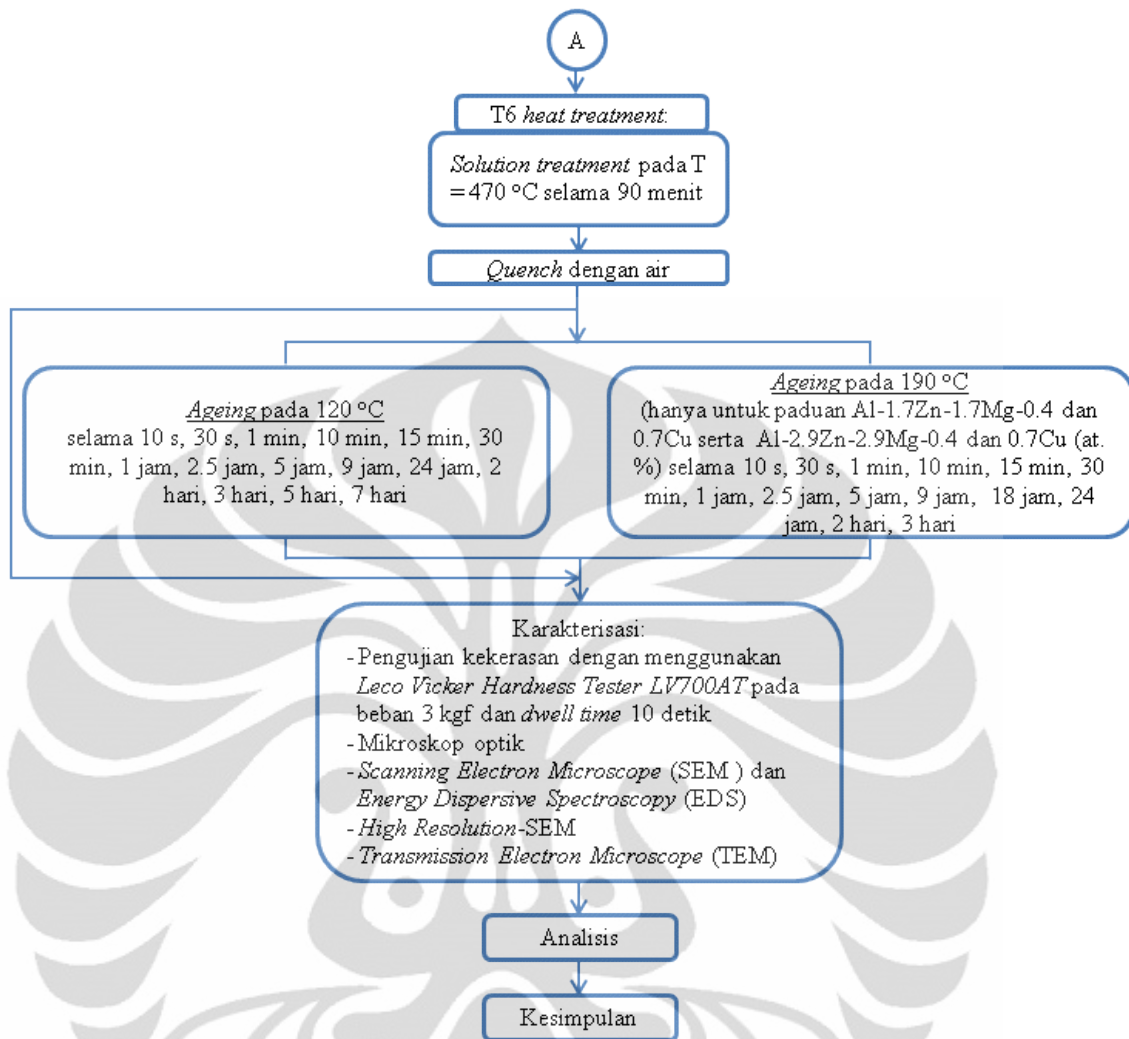


## BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Diagram Alir Penelitian

Alur kerja yang efektif dan efisien sangat diperlukan agar penelitian dapat diselesaikan dan tercapai tujuan yang diharapkan. Gambar 3.1 di bawah merupakan diagram alir yang mendeskripsikan proses penelitian ini.





Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

## 3.2. Alat dan Bahan

### 3.2.1. Alat

1. Mesin potong Struers Secotom-10.
2. Mesin potong skala kecil Struers Accutom-50 ver 3.3.
3. Mesin pengecoran Indutherm Vacuum Tilting Casting Machine VTC200 dengan kemampuan vakum 0-20 mbar (0-2000) N/m<sup>2</sup>.
4. Mesin pemanas *stir heating* IEC C.S 76083V Cat. No 2090.001.
5. *Muffle furnace* Ceramic Engineering.
6. Mesin *grinding* besar Struers DP-U2.
7. Mesin *grinding* Struers RotoPol-22.
8. Mesin poles Struers TegraPol-25.
9. Electropolishing Jet Thinner Struers Tenupol-5.

10. *Cooler machine* Lauda ProLine 855.
11. Mesin *mounting* Struers CitoPress-10.
12. Mesin bor *Waldown* D-10 type 8 SN Series III kapasitas ½ ” IN *steel*.
13. Branson *Degassing Machine* 2510.
14. *Freezer* Forma -86C.
15. Alat rol manual merk Cavallin.
16. *Crucible* dengan volume 155 cm<sup>3</sup> dan maksimum temperatur 2000 °C.
17. Cetakan karbon.
18. Timbangan digital AND ER-180A (beban maksimum 180 gram).
19. *Salth bath* Jetlow Furnaces (400-560 °C) maksimum T = 900 °C.
20. *Oil Bath* SEM (SA) PTY LTD.
21. Alat uji kekerasan LECO Vickers Hardness Tester LV700<sub>AT</sub>.
22. Mikroskop optik Olympus TH4-200.
23. SEM (*Scanning Electron Microscope*) Carl Zeiss AG - EVO<sup>®</sup> 50 Series (dilengkapi 4 detektor EDS).
24. *High Resolution-SEM* Zeiss ULTRA plus Gemini (dengan detektor Bruker XFlash 4010 EDS).
25. TEM (*Transmission Electrone Microscope*) Philips CM12 (dilengkapi dengan Morada CCD kamera).
26. Lemari asam Dynaflo.
27. *Thermocouple* Kane-May KM330.
28. Gatan *mechanical puncher* (preparasi sampel TEM).
29. Mikroskop optik + kamera merk Olympus.
30. SEM (*Scanning Electron Microscope*) LEO 420i.
31. Mikrometer skrup dan jangka sorong digital Mitutoyo.
32. Ember baja untuk *quenching*.
33. *Engraver* dan *stamping punch* (alat pemberi nama pada sampel logam).
34. *Tweezer*/Pinset Inox no.5.
35. *Stab* landasan sampel SEM.
36. Alat bantu lain, meliputi : *heat gun*, *beaker glass*, kaca preparat, *safety goggles*, *safety gloves*, sarung tangan *welder*, *welder's apron*, *full face shield*, *stopwatch*, gergaji tangan, kikir dan tang besar.

Butir 1 sampai 28 merupakan alat dan fasilitas yang digunakan di Australian Centre for Microscopy and Microanalysis (ACMM), The University of Sydney Australia. Sedangkan butir 29 dan 30 adalah alat yang digunakan di Departemen Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

### 3.2.2. Bahan

1. *Ingot* aluminium (99.85 %), seng, magnesium (99.99 %), tembaga dan aluminium *foil*.
2. *Boron-nitride spray coating* untuk pelapis cetakan karbon.
3. Garam *temporal ND Rectifier* untuk *salth bath*.
4. Oli Wacker<sup>®</sup> Silicone Fluid untuk *oil bath*.
5. Keller's reagent: 20 mL H<sub>2</sub>O + 20 mL HNO<sub>3</sub> (70 %) + 20 mL HCl (38 %) + 5 mL HF.
6. Elektrolit 30 vol. % HNO<sub>3</sub> dalam metanol.
7. Pelarut etanol, metanol dan *acetone*.
8. Kertas amplas *grid* #200, #400, #600, #800, #1000, #1200, #2000 dan #4000.
9. *Driller bit* 7/64 " Blue Bullet High Steel Jobber.
10. *Cutting wheel silicon carbide* Struers 10S20 203 × 0.8 × 72 mm dan *aluminium oxide* Struers 50A13 125 × 0.5 × 12.7 mm dan Struers 50A20 200 × 0.8 × 22 mm.
11. Resin akrilik ClaroFast untuk *transparent mounting*.
12. Alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).
13. Nitrogen cair dan *dry ice*.
14. Loctite 460 *instant adhesive*.
15. Kawat baja, *screen wire* baja (wadah sampel pada *salth bath*) dan aluminium (wadah sampel pada *oil bath*).

## 3.3 Proses Pengecoran Paduan Aluminium Seng Magnesium Tembaga

### 3.3.1 Persiapan *Ingot* untuk Pengecoran

#### 3.3.1.1 *Ingot* Aluminium

*Ingot* aluminium pada penelitian ini diperoleh dari Rio Tinto Aluminium (Bell Bay) Limited Company dengan kemurnian 99.88 %. Data kandungan logam



pada *ingot* aluminium dari sertifikat analisis komposisi dapat dilihat pada Tabel 3.1 (korelasikan dengan Lampiran 1).

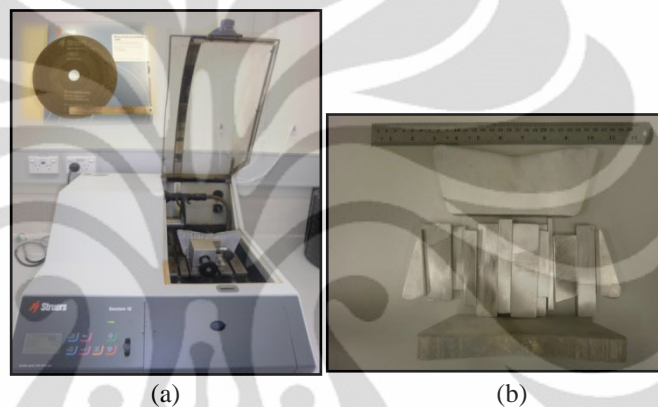
**Tabel 3.1.** Sertifikat analisis komposisi *ingot* aluminium (wt.%).

<b>Cast</b>	<b>B32541</b>	<b>B32914</b>
Aluminium	99.88	99.87
Silicon	0.03	0.03
Iron	0.08	0.09
Copper	0.002	0.001
Manganese	0.001	0.001
Magnesium	<0.001	<0.001
Chromium	0.001	<0.001
Zinc	0.001	0.002
Titanium	<0.001	0.001
Vanadium	0.001	0.001
Gallium	0.014	0.014
Nickel	0.005	0.004
<b>Other Each</b>		
Lead	0.001	0.001
Sodium		0.001
Boron	0.006	0.003
<b>Others Total</b>	0.007	0.005

Dimensi *ingot* aluminium mula-mula cukup besar dengan panjang kira-kira 1 meter, lebar 20 cm dan tebal 10 cm (lihat Gambar 3.2). Kemudian dilakukan pemotongan awal dengan teknik *laser cutting* di salah satu tempat pemotongan logam di Sydney, Australia. Pemilihan metode pemotongan ini bertujuan agar tidak banyak logam yang terbuang dan karena prosesnya yang cepat dan mudah. Setelah itu didapatkan *ingot* aluminium dengan dimensi yang lebih kecil dengan ukuran  $\pm 20 \times 10 \times 2$  cm seperti pada Gambar 3.3 (b). Selanjutnya, dilakukan pemotongan akhir dengan Struers Secotom-10 (lihat Gambar 3.3 (a)) sesuai dengan dimensi *crucible* yang akan digunakan untuk tempat pengecoran.

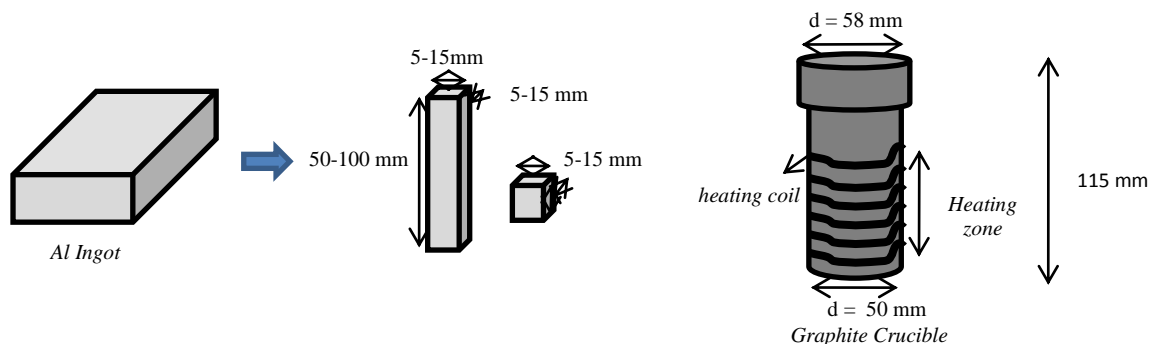


**Gambar 3.2.** Dimensi awal *ingot* aluminium (gambar ditengah dari kiri ke kanan merupakan dimensi *ingot* setelah dilakukan pemotongan).



**Gambar 3.3.** (a) Pemotongan *ingot* menggunakan Struers Secotom-10 dengan *cutting wheels* silicon carbide Struers 10S20 203 × 0.8 × 72 mm. (b) Dimensi *ingot* setelah pemotongan dengan *laser cutting* (atas dan bawah) dan setelah pemotongan dengan Struers Secotom-10 (tengah).

Bentuk akhir *ingot* aluminium siap cor dapat berupa balok memanjang yang ketinggiannya diusahakan berada pada *heating zone crucible* atau kubus yang tidak terlalu kecil untuk meminimalkan kemungkinan hilang pada saat persiapan. Deskripsi skematik pemotongan *ingot* aluminium sesuai dengan ketinggian *crucible* ditunjukkan pada Gambar 3.4.



**Gambar 3.4.** Deskripsi skematik pemotongan *ingot* aluminium sesuai dengan ketinggian *crucible*.

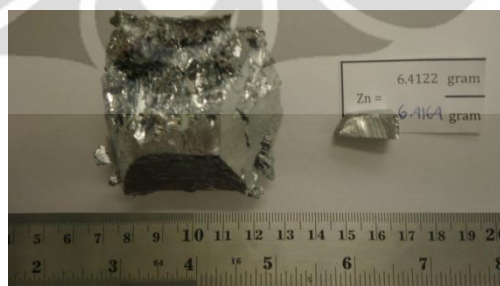
Setelah dilakukan pemotongan akhir, *ingot* perlu diampas untuk meminimalkan oksida-oksida dan pengotor yang ada pada permukaan aluminium. Proses pengampelasan dilakukan dengan menggunakan mesin ampas besar Struers DP-U2 dan kertas SiC berukuran #220 seperti ditunjukkan pada Gambar 3.5.



**Gambar 3.5.** Proses pengampelasan dengan Struers DP-U2 dan kertas SiC #220.

### 3.3.1.2 *Ingot* Seng

*Ingot* Zn diperoleh dari Hayes Metals PTY LTD. Kemurnian logam yang digunakan dalam perhitungan neraca massa diasumsikan 100 % Zn. *Ingot* dipotong dengan gergaji tangan sesuai dengan massa yang diinginkan. Untuk penyesuaian lebih teliti digunakan kikir atau kertas ampas sampai didapatkan nilai yang mendekati massa yang diinginkan. Logam ini memiliki bentuk awal yang tidak teratur sehingga tidak dilakukan pengampelasan permukaan terlalu detail. *Ingot* Zn sebelum dan sesudah pemotongan ditunjukkan pada Gambar 3.6.



**Gambar 3.6.** *Ingot* seng sebelum (kiri) dan sesudah pemotongan (kanan).

### 3.3.1.3 *Ingot* Magnesium

*Purities ingot* magnesium yang digunakan pada penelitian ini diasumsikan sebesar 99.99 %. Magnesium merupakan logam lunak yang ringan karena memiliki massa atom relatif yang kecil yaitu 24.32 g/mol, sehingga dalam proses pemotongannya perlu digunakan masker sebagai pelindung. Dalam pemotongan logam ini diusahakan agar didapatkan satu potong magnesium, untuk menghindari *weight loss* saat persiapan dan meminimalisir oksida pada permukaan. *Ingot* magnesium awal dan siap cor ditunjukkan pada Gambar 3.7.

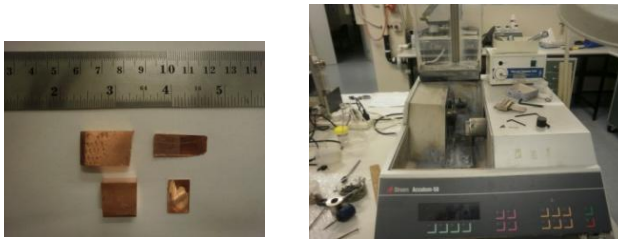


Gambar 3.7. *Ingot* magnesium awal (kiri) dan siap cor (kanan).

### 3.3.1.4 *Ingot* Tembaga

Kemurnian *ingot* tembaga dalam neraca perhitungan massa yang digunakan adalah 99.95 %. Titik lebur Cu cukup tinggi yaitu sekitar 1083 °C<sup>[12]</sup>. Nilai ini jauh lebih tinggi dibandingkan dengan titik lebur logam Zn (419.5 °C) bahkan masih diatas titik uap Zn yaitu sebesar 907 °C. Hal ini memberikan efek bahwa tidak dimungkinkan untuk melebur logam tembaga dalam membuat paduan Al-Zn-Mg-Cu dari logam murninya. Sehingga mekanisme pelarutan tembaga dalam pembuatan paduan ini adalah dengan cara difusi logam.

Difusi merupakan proses pelarutan fasa padat (perpindahan atom-atom logam) yang terjadi pada permukaan logam dibantu dengan adanya panas. Sehingga dalam penelitian ini dilakukan pemotongan *ingot* tembaga menjadi pelat tipis dengan ketebalan maksimum 0.7 mm. Proses pemotongan dilakukan dengan mesin potong Struers Accutom-50 ver 3.3 (lihat Gambar 3.8). Kekurangan dari pemotongan secara tipis ini adalah lebih banyaknya oksida karena bertambahnya permukaan logam tembaga. Hal ini dapat diminimalkan dengan pengamplasan yang baik sebelum dipotong menjadi pelat tipis.



**Gambar 3.8.** Pemotongan *ingot* tembaga menjadi pelat tipis dengan menggunakan mesin potong Struers Accutom-50 ver 3.3.

**Struers Accutom-50 ver 3.3**

*Wheel* : 357 CA

*Feed* : 0.03 mm/s

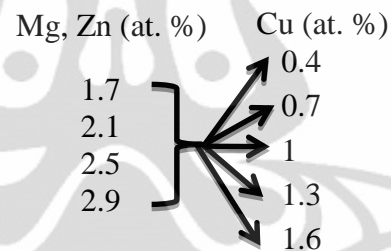
*Speed* : 2500 rpm

*Force* : Normal

Ketebalan setiap *slice* : 0.5-0.7 mm

### 3.3.1.5 Perhitungan Neraca Massa

*Range* komposisi unsur penyusun paduan Al-Zn-Mg-Cu dalam penelitian ini adalah Zn dan Mg dibuat dalam rentang 1.7-3.0 at. % serta konsentrasi Cu 0.4-1.6 at. %. Berdasarkan *range* tersebut, unsur Zn dan Mg dibagi kedalam 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. Skematik pembagian *range* komposisi menjadi 20 paduan tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.9.



**Gambar 3.9.** Skematik kombinasi komposisi menjadi 20 paduan Al-Zn-Mg-Cu.

Setelah ditentukan komposisi 20 paduan, selanjutnya dilakukan perhitungan neraca massa untuk menentukan berat setiap logam murni yang diperlukan dalam proses pengecoran. Pada awalnya dilakukan perhitungan neraca massa secara langsung tanpa memperhitungkan *weight loss* elemen akibat dari temperatur proses pengecoran. Neraca massa awal ditentukan dengan perhitungan terhadap total massa sampel yang ingin dibuat sebesar 160 gram seperti ditunjukkan pada Tabel 3.2.



Tabel 3.2. Neraca massa awal 20 paduan Al-Zn-Mg-Cu.

No.	Atomic Percent (%)					Weight Percent (%)					Massa (gram)			
	Zn	Mg	Cu	Al	sum	Zn	Mg	Cu	Al	sum	Zn	Mg	Cu	Al
1	1.7	1.7	0.4	96.2	100	4.00763	1.48984	0.91652	93.586	100	6.41221	2.38612	1.46643	149.963
2	1.7	1.7	0.7	95.9	100	3.99184	1.48397	1.59759	92.9266	100	6.38695	2.37672	2.55615	148.906
3	1.7	1.7	1	95.6	100	3.97618	1.47814	2.27332	92.2724	100	6.36188	2.3674	3.63731	147.858
4	1.7	1.7	1.3	95.3	100	3.96063	1.47236	2.94376	91.6232	100	6.33701	2.35814	4.71002	146.817
5	1.7	1.7	1.6	95	100	3.94521	1.46663	3.60898	90.9792	100	6.31234	2.34896	5.77437	145.785
6	2.1	2.1	0.4	95.4	100	4.92523	1.83095	0.91182	92.332	100	7.88036	2.93245	1.45892	147.953
7	2.1	2.1	0.7	95.1	100	4.90592	1.82377	1.58943	91.6809	100	7.84947	2.92096	2.54309	146.91
8	2.1	2.1	1	94.8	100	4.88677	1.81665	2.26175	91.0348	100	7.81882	2.90956	3.61881	145.875
9	2.1	2.1	1.3	94.5	100	4.86776	1.80959	2.92885	90.3938	100	7.78842	2.89824	4.68615	144.847
10	2.1	2.1	1.6	94.2	100	4.8489	1.80258	3.59077	89.7578	100	7.75824	2.88701	5.74523	143.828
11	2.5	2.5	0.4	94.6	100	5.83346	2.16859	0.90717	91.0908	100	9.33354	3.47321	1.45147	145.964
12	2.5	2.5	0.7	94.3	100	5.81071	2.16013	1.58136	90.4478	100	9.29714	3.45967	2.53018	144.934
13	2.5	2.5	1	94	100	5.78814	2.15174	2.25031	89.8098	100	9.26102	3.44623	3.60049	143.912
14	2.5	2.5	1.3	93.7	100	5.76574	2.14341	2.91408	89.1768	100	9.22518	3.43289	4.66253	142.897
15	2.5	2.5	1.6	93.4	100	5.74352	2.13515	3.57274	88.5486	100	9.18962	3.41966	5.71638	141.891
16	2.9	2.9	0.4	93.8	100	6.73248	2.5028	0.90257	89.8622	100	10.772	4.00848	1.44411	143.995
17	2.9	2.9	0.7	93.5	100	6.70636	2.49309	1.57337	89.2272	100	10.7302	3.99293	2.51739	142.978
18	2.9	2.9	1	93.2	100	6.68043	2.48345	2.23898	88.5971	100	10.6887	3.9775	3.58237	141.968
19	2.9	2.9	1.3	92.9	100	6.65471	2.47389	2.89947	87.9719	100	10.6475	3.96218	4.63915	140.967
20	2.9	2.9	1.6	92.6	100	6.62919	2.4644	3.55489	87.3515	100	10.6067	3.94699	5.68782	139.972

Konversi *atomic percent* (at. %) menjadi *weight percent* (wt. %) dilakukan untuk mempermudah perhitungan massa *ingot* yang dibutuhkan dalam pengecoran paduan. Perhitungan konversi *weight percent* elemen *i* dilakukan sesuai dengan Persamaan 3.1.

$$\text{wt. \%}_i = \frac{\text{at. \%}_i \times \text{Ar}_i}{\sum \text{at. \%}_i \times \text{Ar}_i} \quad (3.1)$$

wt. %<sub>*i*</sub> = persen berat elemen *i*

at. %<sub>*i*</sub> = persen atom elemen *i*

Ar<sub>*i*</sub> = massa atom relatif elemen *i*

Selanjutnya untuk mendapatkan massa *ingot* yang dibutuhkan untuk proses pengecoran, dilakukan dengan menggunakan hasil pada Persamaan 3.1 ke perhitungan massa pada Persamaan 3.2.

$$\text{massa ingot (gram)} = \left( \frac{100}{\% \text{ purity ingot}} \right) \left( \frac{\text{wt. \% elemen}}{100} \right) (\text{massa total}) \quad (3.2)$$

% *purity ingot* = persen kemurnian *ingot* yang didapatkan dari sertifikat *ingot*

massa total = berat akhir sampel yang diinginkan pada penelitian ini (160 gram)

Universitas Indonesia

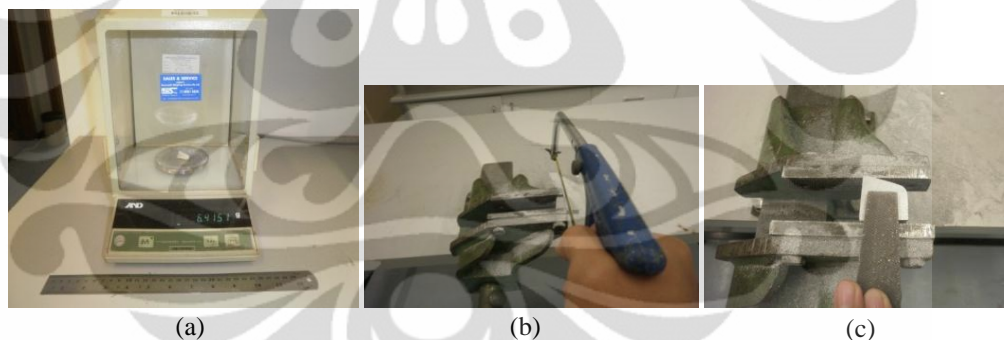
Data yang digunakan dalam perhitungan pada Tabel 3.2 disajikan dalam Tabel 3.3 dibawah ini.

**Tabel 3.3.** Data yang digunakan dalam perhitungan neraca massa.

	Al	Zn	Mg	Cu
Massa atom relatif, Ar (g/mol)	26.98	65.38	24.305	63.55
Purity ingot (%)	99.85	100	99.9	100

### 3.3.1.6 Penimbangan *Ingot*

*Ingot* yang sudah dipotong sesuai dengan keperluan dan dibersihkan permukaannya dari oksida dan pengotor selanjutnya ditimbang sesuai dengan perhitungan neraca massa pada Tabel 3.2. Penimbangan dilakukan dengan neraca massa digital AND ER-180A (beban maksimum 180 gram) seperti ditunjukkan pada Gambar 3.10 (a). Penyesuaian massa sampai didapatkan hasil yang mendekati dengan nilai yang diharapkan dilakukan dengan pemotongan dengan gergaji tangan, *filing* dengan kikir (seperti ditunjukkan berturut-turut pada Gambar 3.10 (b) dan (c)) atau pengamplasan manual dengan *silica paper*.



**Gambar 3.10.** (a) Timbangan digital AND ER-180A. (b) Pemotongan dengan gergaji tangan. (c) *Filing* dengan kikir.

Khusus untuk *ingot* aluminium dilakukan penimbangan terakhir, karena massa aluminium hasil perhitungan masih perlu dikurangi dengan massa aluminium *foil* yang digunakan untuk membungkus *ingot* seng dan magnesium pada proses pengecoran. Hal ini perlu dilakukan untuk meminimalkan deviasi komposisi aluminium pada perhitungan dan hasil pengecoran. Selanjutnya *ingot* dikumpulkan ke dalam satu kantong plastik dan diberi label sesuai dengan komposisinya. Penyimpanan di dalam *plastic bag* (seperti pada Gambar 3.11) sampai dilakukan pengecoran perlu dilakukan untuk meminimalkan proses

oksidasi dipermukaan *ingot* yang sudah siap *casting* dan menghindari tercecernya logam kecil yang dapat mempengaruhi nilai komposisi paduan yang diinginkan.



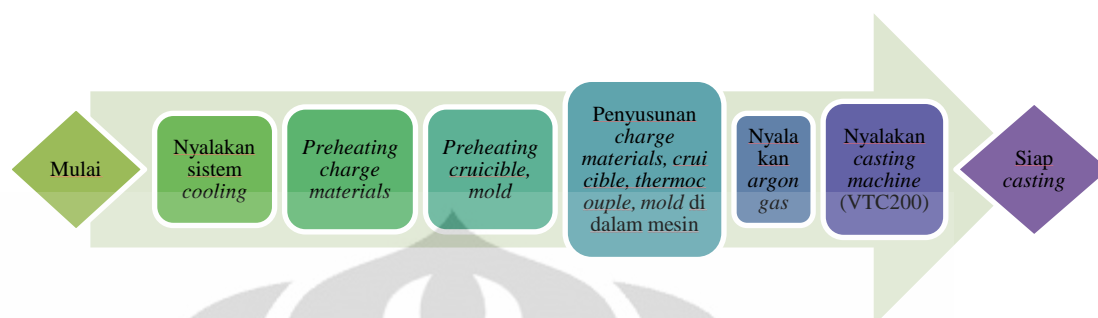
**Gambar 3.11.** *Ingot* aluminium, seng, magnesium dan tembaga siap *casting*.

### 3.3.2 Persiapan Pengecoran Paduan Al-Zn-Mg-Cu

Proses pengecoran paduan Al-Zn-Mg-Cu pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan mesin Indutherm Vacuum Tilting Casting Machine VTC200 di Australian Centre for Microscopy and Microanalysis (ACMM) The University of Sydney, Australia. Pengecoran dengan menggunakan alat ini dilakukan dengan beberapa tahap seperti persiapan *preheating* material umpan, *crucible* dan cetakan, penempatan material umpan dan *thermocouple*, pengecekan kesiapan mesin yang meliputi *cooler*, *vacuum*, *argon gas*, *crucible* dan *mold chamber*, *display* awal mesin, serta pengaturan dan pengontrolan parameter selama proses.



Rangkuman proses pengecoran paduan Al-Zn-Mg-Cu ditunjukkan pada Gambar 3.12.



**Gambar 3.12.** Rangkuman proses pengecoran paduan Al-Zn-Mg-Cu dengan Indutherm Vacuum Tilting Casting Machine VTC200.

### 3.3.2.1 Pengaktifan Sistem Pendingin Mesin

Hal pertama yang harus dilakukan ketika akan dilakukan pengecoran dengan unit Indutherm Vacuum Tilting Casting Machine VTC200 adalah pengaktifan sistem pendingin mesin. Hal ini sangat penting terkait dengan keamanan dan keselamatan kerja karena temperatur operasi mesin yang cukup tinggi. Proses persiapan pengecoran lain tidak akan dilanjutkan jika dirasakan terdapat masalah pada sistem pendingin mesin.

Mesin pendingin yang digunakan menggunakan prinsip sirkulasi cairan *coolant*, sehingga perlu dicek secara berkala ambang batas ketersediaannya. Temperatur aman cairan *coolant* pada saat mesin menyala adalah 20-21 °C, tergantung pada suhu lingkungan sekitar. Sehingga perlu diatur juga tata letak unit pendingin dengan kesatuan mesin pengecoran agar sirkulasi udara lingkungan sekitar cukup stabil dan tidak mudah meningkat. Perlu dihindari adanya benda-benda yang dapat menghalangi bagian depan mesin karena adanya sistem sirkulasi udara hangat yang keluar. Unit sistem pendingin ini ditunjukkan pada Gambar 3.13. Mesin dibiarkan menyala sejak  $\pm 30$  menit sebelum dan sesudah dilakukan proses pengecoran untuk memastikan keadaan temperatur unit sistem *casting* berada pada ambang batas temperatur yang normal. Maksimum temperatur cairan pendingin yang aman untuk mesin adalah 30 °C.



**Gambar 3.13.** Mesin pendingin pada rangkaian Indutherm Vacuum Tilting Casting Machine VTC200.

### 3.3.2.2 Preheating Material Umpan

Pemanasan material umpan dilakukan dengan menggunakan mesin pemanas *stir heating* IEC C.S 76083V Cat. No 2090.001 pada temperatur 100-120 °C selama  $\pm 15$  menit seperti ditunjukkan pada Gambar 3.14. Proses ini bertujuan untuk menghilangkan uap air yang mungkin terdapat pada permukaan logam *ingot*. Uap air berbahaya dalam proses pengecoran aluminium karena dapat menjadi sumber gas hidrogen yang terlarut secara atomik dalam aluminium cair. Peningkatan atom H di dalam Al cair akan mengakibatkan H yang tidak larut berada dalam kondisi *super saturated* membentuk kumpulan molekul gas H<sub>2</sub> yang merupakan suatu cacat porositas gas yang dapat menyebabkan kekuatan tarik, keuletan, kekuatan fatik dan kekuatan dampak menurun.



**Gambar 3.14.** Proses *preheating* material umpan pada temperatur 100-120 °C selama  $\pm 15$  menit.

Proses *preheating ingot* tembaga dilakukan dalam waktu yang lebih singkat, karena logam ini bersifat sangat konduktif sehingga mudah sekali terbentuk oksida di permukaannya akibat panas. Tembaga murni memiliki temperatur *melting* cukup tinggi (sekitar 1083 °C), dengan adanya oksida dapat menyebabkan terjadinya peningkatan titik lebur Cu. Sehingga oksida pada logam tembaga sangat dihindari dalam pengecoran paduan Al-Zn-Mg-Cu dari logam murninya yang sudah memiliki temperatur lebur cukup tinggi (sekitar 1083 °C).

### 3.3.2.3 *Preheating Crucible* dan Cetakan

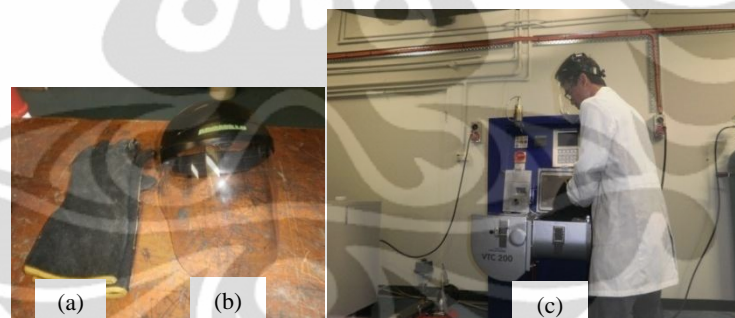
*Crucible* merupakan wadah tempat dilakukan proses peleburan logam, sedangkan cetakan merupakan cetakan atau wadah ketika logam cair dituang. *Crucible* dan cetakan dalam pengecoran aluminium perlu dipanaskan pada temperatur 300-400 °C untuk menghilangkan uap air dan menghindari adanya *thermal shock material*. *Preheating* pada cetakan juga bertujuan untuk mengontrol laju dan arah pembekuan sehingga dapat menghindari adanya retakan pada produk cor karena adanya perbedaan temperatur yang ekstrim. Pada penelitian ini untuk memudahkan mobilitas cetakan dan *crucible* ketika dipindahkan dari *muffle furnace* ke mesin *vacuum casting*, maka *preheating* dilakukan pada temperatur 140-160 °C selama  $\pm 15$  menit. Proses *preheating crucible* dan cetakan ditunjukkan pada Gambar 3.15 (a) dan (b).



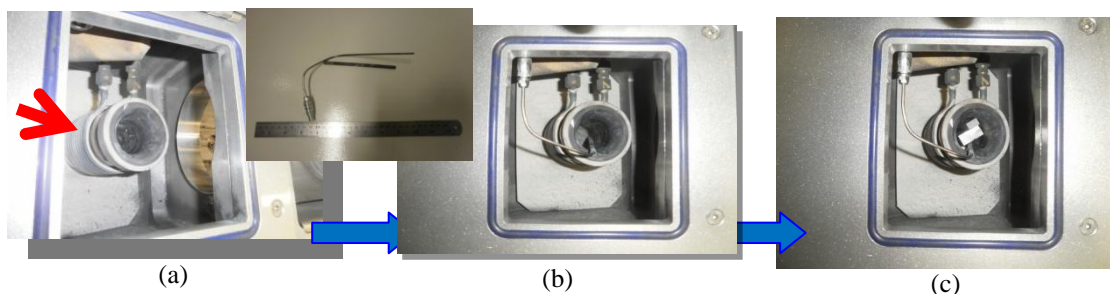
Gambar 3.15. (a) Proses *preheating crucible*. (b) Proses *preheating* cetakan.

### 3.3.2.4 Penyusunan Material Umpan, *Thermocouple*, *Crucible* dan Cetakan di dalam Mesin

Pemindahan material umpan, *crucible* dan cetakan dilakukan segera setelah *preheating* dengan menggunakan *trolley* besi dilengkapi alat pelindung diri berupa sarung tangan *welder* dan *full face shield* (lihat Gambar 3.16 (a), (b) dan (c)). *Crucible* yang telah di-*preheating* pertama kali dipindahkan dan diletakkan pada *crucible chamber* pada mesin seperti ditunjukkan pada Gambar 3.17 (a).



Gambar 3.16. Alat pelindung diri (a) Sarung tangan *welder*. (b) *Full face shield*. (c) Contoh penggunaan alat pelindung diri.



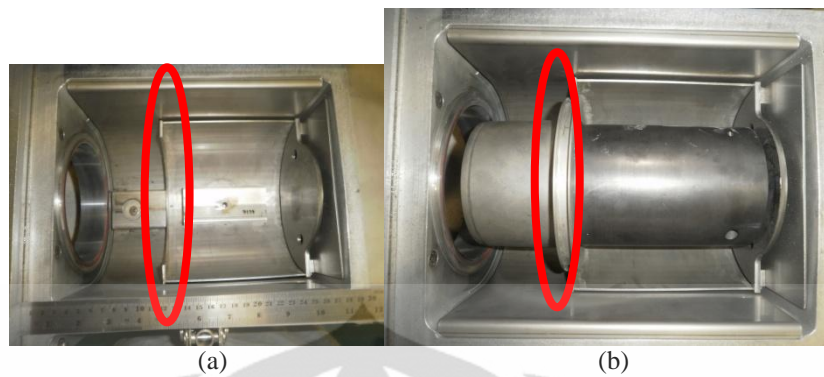
Gambar 3.17. (a) Pemasangan *crucible* pada *crucible chamber* (tanda panah merah menunjukkan *heating coil*). (b) Pemasangan *thermocouple* pada *crucible*. (c) Susunan *ingot* dan *thermocouple* pada *crucible*.

Selanjutnya, dengan segera dipanaskan cetakan pada *muffle furnace*. Bersama dengan ini, dilakukan penyusunan *thermocouple* dan material umpan (yang sudah di-*preheating*) di dalam *crucible*. Setelah *thermocouple* terpasang (lihat Gambar 3.17 (b)) dilakukan penyusunan *ingot* aluminium. Balok-balok aluminium ini disusun agar tetap berada pada zona pemanasan *crucible*. Selain itu penyusunan yang baik dapat dilakukan dengan pengaturan kontak permukaan antar *ingot* aluminium sedemikian rupa sehingga mempermudah proses peleburan. Penyusunan ini dilakukan sedemikian rupa untuk memastikan seluruh logam akan melebur dan tidak ada yang melekat di bagian permukaan *crucible* atau menempel pada *thermocouple*. Logam yang tertinggal dipermukaan dan tidak ikut melebur dapat membahayakan proses karena akan merusak *crucible*.

Setelah susunan *ingot* aluminium dirasa sesuai dan dipastikan dapat melebur dengan baik, dilanjutkan dengan penyusunan *ingot* magnesium, seng, dan tembaga. Penyusunan ini dilakukan berdasarkan prinsip berat jenis logam. Logam magnesium yang ringan ( $\rho = 1.738 \text{ g/cm}^3$ ) diletakkan pada dasar *crucible* karena akan mudah bercampur dan naik ke atas pada saat peleburan. Logam seng diselipkan di sela-sela bagian atas *ingot* aluminium dikarenakan berat jenisnya yang cukup tinggi ( $\rho = 7.14 \text{ g/cm}^3$ ) sehingga akan mudah bercampur dan turun ke bagian dasar *crucible*. *Ingot* tembaga yang memiliki  $\rho = 8.92 \text{ g/cm}^3$  seharusnya juga diletakkan dibagian permukaan susunan material umpan. Namun karena sudah dipotong dengan ukuran yang kecil dan cukup tipis (ketebalan maksimum 0.7 mm), sehingga dikhawatirkan dapat “lompat” dari *crucible* akibat dari perbedaan medan induksi yang tinggi pada saat akan dilebur. Maka penyusunan *ingot* tembaga lebih bersifat fleksibel mengikuti susunan yang sudah ada. Biasanya logam tembaga diselipkan pada sela-sela *ingot* lain dan dihindari penyusunan dekat dengan *thermocouple* karena dapat menempel.

Susunan *ingot* dan *thermocouple* pada *crucible* yang sudah siap untuk *casting* ditunjukkan pada Gambar 3.17 (c). Cetakan diletakkan terakhir kali pada *mold chamber*. Cetakan terdiri dari dua bagian yaitu penutup atau kepala dan cetakan itu sendiri. Bagian penutup harus dipastikan *fit* pada *groove* yang ada pada *mold chamber* (lihat Gambar 3.18 (a)). Susunan cetakan yang sesuai dan sudah siap digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.18 (b).





**Gambar 3.18.** (a) *Groove* pada *mold chamber*. (b) Pemasangan cetakan yang sesuai.

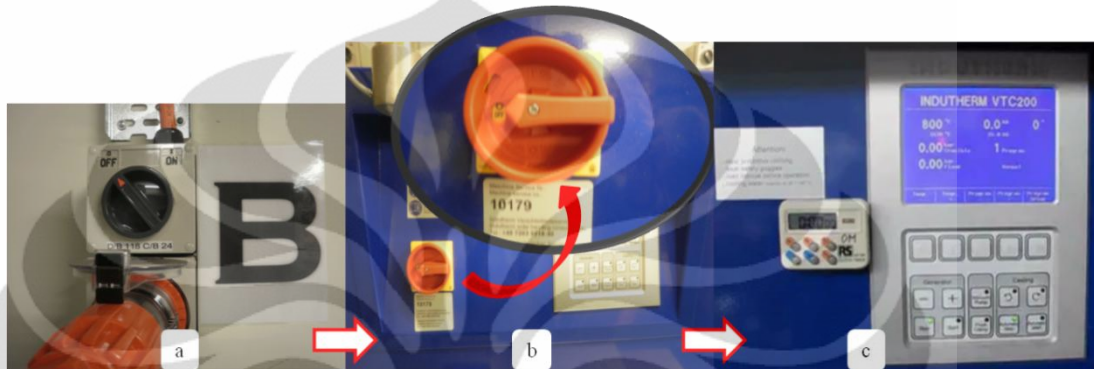
### 3.3.2.5 Pengaktifan Gas Argon dan Indutherm Vacuum Tilting Casting Machine VTC200

Pengecekan akhir dilakukan untuk memastikan *thermocouple* dan cetakan sudah terpasang dengan baik pada mesin. Selanjutnya dilakukan penguncian *crucible* dan *mold chamber* seperti ditunjukkan pada Gambar 3.19. Setelah *chamber* terkunci dengan baik, katup gas argon (sebagai *protective gas*) dibuka sampai batas yang sudah ditentukan. Waktu tunggu untuk memastikan *chamber* sudah terisi dengan cukup gas biasanya  $\pm 10$  menit yang setelah itu mesin siap untuk diaktifkan. Mesin akan mulai menambahkan gas pelindung ke area induksi setelah mencapai temperatur proses lebih dari 500 °C.



**Gambar 3.19.** *Crucible* dan *mold chamber* harus dipastikan terkunci dengan baik (ditunjukkan dengan tanda panah).

Pengaktifan Indutherm Vacuum Tilting Casting Machine VTC200 dilakukan dengan memutar saklar utama arus listrik (lihat Gambar 3.20 (a)) dan saklar pada mesin (lihat Gambar 3.20 (b)) ke arah *on* (searah jarum jam). Tampilan mesin yang sudah menyala dan siap dilakukan *setting* parameter ditunjukkan pada Gambar 3.20 (c). Rangkaian kesatuan sistem *casting* yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.21.



**Gambar 3.20.** (a) Saklar utama arus listrik. (b) Saklar arus pada mesin. (c) Tampilan mesin *on*.



**Gambar 3.21.** (a) Mesin pendingin. (b) Pompa vakum. (c) *Crucible chamber*. (d) *Mold chamber*. Kesatuan (c) dan (d) disebut *inductor housing*. (e) Tabung gas argon.

### 3.3.3 Pengecoran Paduan Al-Zn-Mg-Cu

#### 3.3.3.1 Pengaturan Parameter Pengecoran pada Mesin

Terdapat beberapa parameter pengecoran pada mesin yang dapat diatur untuk disesuaikan dengan proses yang akan dilakukan. Tampilan parameter dan tombol pengaturan mesin dapat dilihat pada Gambar 3.22 (a) dan (b). Parameter yang perlu diatur sebelum proses pengecoran diantaranya sebagai berikut:

- a. **Generator start (kW):** merupakan *supply* daya awal yang akan diberikan mesin untuk proses pelelehan. Nilai ini mempengaruhi kecepatan kenaikan temperatur proses hingga mencapai titik tertentu. Sehingga besarnya daya awal berhubungan dengan temperatur maksimum dari pengecoran yang diizinkan. Beberapa percobaan perlu dilakukan untuk menentukan besarnya daya awal yang sesuai untuk suatu proses pengecoran. Pada penelitian ini, ketika diberikan daya awal sebesar 12 kW, temperatur naik mencapai 725 °C dalam waktu kurang dari 2 menit, dan terus naik sampai titik maksimum pada 840 °C. Logam Zn menguap pada temperatur 907 °C, sehingga daya awal 12 kW tidak sesuai untuk proses pengecoran dalam penelitian ini. Beberapa percobaan yang telah dilakukan memberi kesimpulan bahwa daya awal yang sesuai untuk pengecoran paduan Al-Zn-Mg-Cu dengan menggunakan mesin Indutherm Vacuum Tilting Casting Machine VTC200 adalah 6 kW. Selain itu, untuk menghindari lompatan temperatur (akibat laju kenaikan temperatur yang cepat) *supply* daya perlu diturunkan menjadi 4.5 kW ketika mencapai nilai sekitar 460 °C, dengan cara menekan tombol *minus* pada panel generator mesin.
- b. **Temperatur:** disesuaikan dengan nilai temperatur awal proses pengecoran yang diinginkan. Pengaturan temperatur awal berbanding lurus dengan *generator start*. Semakin tinggi nilai temperatur awal yang diinginkan semakin besar *supply* daya yang dibutuhkan. Sebaiknya nilai pengaturan ini di bawah dan mendekati temperatur *holding* yang diinginkan. Pada penelitian ini nilai pengaturan temperatur awal yang sesuai adalah 705 °C dengan pertimbangan nilai temperatur *holding* yang aman untuk pengecoran paduan Al-Zn-Mg-Cu adalah 720-725 °C.



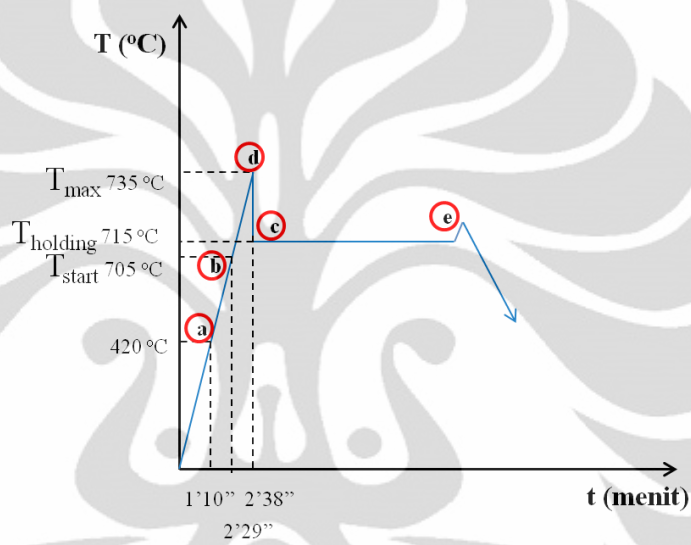
- c. **Melting pressure**: merupakan pengaturan tekanan pada saat peleburan. Sesuai dengan spesifikasi mesin, tekanan vakum maksimum adalah 2000 N/m<sup>2</sup> atau sekitar 0.02 atm. Tekanan yang digunakan pada penelitian ini adalah 100 N/m<sup>2</sup> atau sekitar 0.001 atm.
- d. **Vibration time**: merupakan pengaturan lamanya getaran atau vibrasi lelehan logam sesaat sebelum dilakukan penuangan. Secara umum, semakin besar nilai ini baik untuk meningkatkan *fluidity* logam cair. Lamanya vibrasi yang digunakan dalam pengecoran paduan Al-Zn-Mg-Cu pada penelitian ini adalah 20 detik.
- e. **Cooling time**: merupakan pengaturan waktu tahan mesin dalam keadaan *tilting* atau vertikal pada saat penuangan. Waktu yang sesuai perlu ditentukan untuk menghindari logam cair tertuang balik kembali ke *crucible chamber* setelah *re-tilting*, yang berbahaya dan dapat merusak komponen. Pada pengecoran Al-Zn-Mg-Cu ini digunakan waktu *cooling* maksimum yaitu 290 detik, guna memastikan seluruh cairan logam sudah membeku.



**Gambar 3.22.** (a) Tampilan parameter mesin. (b) Tombol pengaturan mesin

### 3.3.3.2 Proses Pengecoran Paduan Al-Zn-Mg-Cu dengan Indutherm Vacuum Tilting Casting Machine VTC200

Jika semua parameter sudah diatur, maka selanjutnya proses pengecoran siap untuk dimulai yaitu dengan menekan tombol Automatic Start seperti ditunjukkan pada Gambar 3.22. Secara segera temperatur akan mulai naik dengan cepat tergantung pada *supply* daya generator awal yang diberikan seperti dijelaskan pada butir 3.3.3.1 sebelumnya. Contoh peristiwa perubahan temperatur dalam salah satu proses pengecoran dapat dilihat pada Gambar 3.23.



**Gambar 3.23.** Grafik perubahan temperatur selama proses pengecoran.

Grafik pada Gambar 3.23 di atas memiliki beberapa titik perubahan temperatur penting yang dapat dijelaskan sebagai berikut:

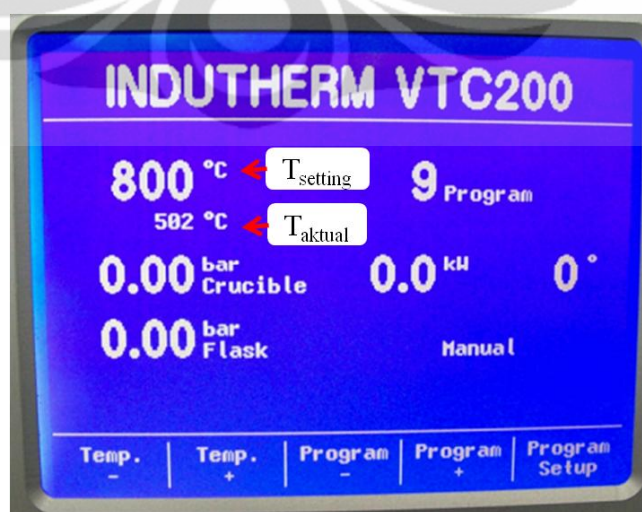
- Titik awal dimana logam Zn mulai mencair, dimana jika diamati melalui jendela pengamat (lihat Gambar 3.24) terlihat *ingot* sudah mulai *glowing* dan siap meleleh.



**Gambar 3.24.** Jendela untuk mengamati proses peleburan, terlihat pelat emas yang dapat digunakan untuk mengurangi radiasi cahaya.

- b. Titik temperatur sesuai dengan pengaturan awal yang dilakukan sebelum dimulainya proses pengecoran seperti dijelaskan pada butir 3.3.3.1.
- c. Temperatur mencapai nilai  $T_{\text{holding}}$  yang diinginkan. Waktu tahan proses ditentukan manual dengan bantuan *stopwatch*.
- d. Temperatur maksimum yang dicapai dalam proses pengecoran. Nilainya dapat dikendalikan dengan menurunkan *supply* daya menjadi 4.5 kW sesaat setelah mencapai temperatur sekitar 460 °C.
- e. Temperatur tuang logam cair biasanya dilakukan setelah menaikkan T sekitar 20-25 °C dari  $T_{\text{holding}}$  selama  $\pm 1$  menit sebelum *pouring*, untuk meningkatkan fluiditas.

Jika secara visual *ingot* belum meleleh padahal temperatur sudah melampaui  $T_{\text{melting}}$  logam (misalkan karena ukuran blok *ingot* yang tebal dan besar), maka perlu dilakukan tindakan tertentu untuk mempercepat proses peleburan. Tindakan yang dapat dilakukan misalnya dengan meningkatkan pengaturan temperatur mesin. Namun pengaturan ini perlu diperhitungkan dengan mengamati perbedaan nilai *setting* temperatur dan  $T_{\text{aktual}}$  pada suatu proses pengecoran (lihat Gambar 3.25). Setiap peningkatan temperatur proses yang ingin dilakukan, diusahakan tetap berada tidak jauh dari  $T_{\text{aktual}}$  mesin (menjaga *gap*  $T_{\text{setting}}$  dan  $T_{\text{aktual}}$  seminimum mungkin). Hal ini perlu dilakukan untuk menghindari lompatan daya yang terlampaui tinggi, sehingga akan meningkatkan  $T_{\text{maksimum}}$  proses.



Gambar 3.25. Tampilan  $T_{\text{setting}}$  dan  $T_{\text{aktual}}$  pada mesin.

Hal lain yang perlu diperhatikan selama proses pengecoran adalah temperatur *cooler* (lihat layar tampilan mesin), kondisi vakum (dengan meraba bagian dinding mesin vakum) dan tekanan gas argon (melihat jarum tekanan gas pada bagian atas katup tabung). Jika terjadi peristiwa berbahaya yang dapat mengancam keselamatan, proses pengecoran dapat dihentikan segera dengan cara menekan tombol Automatic Stop seperti ditunjukkan pada Gambar 3.22.

### 3.3.3.3 Proses Penuangan Logam Cair

Setelah proses peleburan dan pepaduan *ingot* dirasa sudah selesai, selanjutnya dilakukan penuangan logam cair ke dalam cetakan dengan menekan ulang tombol Automatic Start yang sudah berkelap-kelip sejak penekanan pertama. Segera setelah perintah ini (berselang dengan jeda waktu untuk vibrasi logam cair), *inductor housing* akan berputar (*tilting*)  $90^\circ$  searah jarum jam membentuk susunan vertikal, dimana *crucible chamber* akan berada tepat di atas *mold chamber* seperti ditunjukkan pada Gambar 3.26.



**Gambar 3.26.** *Inductor housing* mengalami *tilting*  $90^\circ$  ke arah vertikal untuk proses *pouring*.

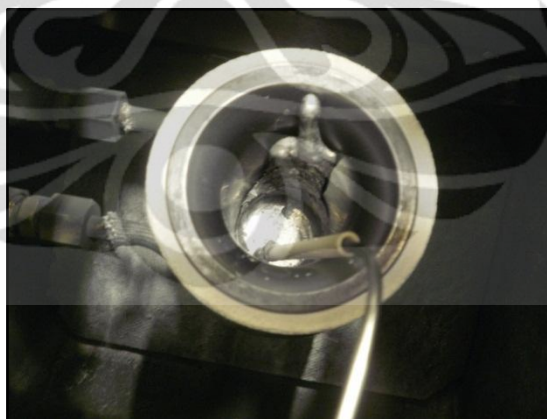
Waktu tahan kondisi *tilting* ini akan sama dengan pengaturan *cooling time* seperti dijelaskan pada butir 3.3.3.1 sebelumnya. Setelah *inductor housing* kembali ke posisi semula, dilakukan proses tunggu untuk memungkinkan pengangkatan cetakan dan pengambilan *billet* produk cor. Gas argon akan dibiarkan tetap mengalir sampai temperatur pada layar mesin berada di bawah  $400^\circ\text{C}$ , untuk menghindari oksidasi Zn. Setelah katup gas argon ditutup, *crucible* dan *mold chamber* dapat dibuka untuk mempercepat proses pendinginan.



### 3.3.3.4 Pengambilan, Pengecekan Visual Sampel dan Pemberian Label

Sesaat setelah *inductor housing* mengalami *re-tilting* ke posisi semula, mesin akan mengeluarkan kupon yang berisi data parameter proses yang dilakukan selama pengecoran (lihat Lampiran 3 dan Lampiran 4). Kertas kupon ini diambil dan disimpan bersama dengan *billet* produk cor dan *residue*. Data yang ada nantinya akan digunakan untuk analisa dan perbaikan proses pengecoran berikutnya.

Ketika temperatur *crucible* berada dibawah 100 °C, tampilan pada layar mesin tidak dapat memberikan data  $T_{\text{aktual}}$  lagi. Sehingga mesin dimatikan dengan cara memutar saklar pada mesin dilanjutkan saklar utama arus listrik ke arah *off* (kebalikan proses pada Gambar 3.20). Selanjutnya, cetakandiambil dari *mold chamber* kemudian dibalik untuk mengambil *billet* produk cor. Selain itu, *crucible* juga diambil dari *crucible chamber* untuk mengambil *residue* yang biasanya melekat pada dinding *crucible* dan batang *thermocouple shield* (lihat Gambar 3.27). Daerah melekatnya *residue* pada *crucible* perlu ditandai untuk memberikan arah penuangan yang berbeda pada proses pengecoran berikutnya. Hal ini dilakukan guna menghindari aus yang terlalu cepas pada salah satu bagian dinding *crucible* karena dilewati logam cair terus menerus selama penuangan.



**Gambar 3.27.** *Residue* yang biasanya melekat pada *crucible* dan *thermocouple shield*.

Pengecekan visual permukaan *billet* dan *residue* perlu dilakukan untuk mengestimasi proses pemaduan telah terjadi dengan sempurna. Jika ditemukan *ingot* murni (sebagai contoh *ingot* tembaga) yang masih belum melebur, baik pada *residue* maupun permukaan *billet*, berarti proses pemaduan atau difusi logam belum berlangsung dengan sempurna, sehingga perlu dilakukan analisa dan penyesuaian parameter proses untuk pengecoran berikutnya.

Penandaan kode sampel pada *billet* dilakukan dengan menggunakan *stamping punch* seperti ditunjukkan pada Gambar 3.28 (a) dan (b). *Residue* dan *billet* produk cor ditimbang dengan menggunakan timbangan digital AND ER-180A dan hasilnya dicatat pada kertas kupon parameter. Setelah itu, *billet*, *residue* dan kupon parameter proses dimasukkan pada *plastic bag* dan diberikan label seperti ditunjukkan pada Gambar 3.29.



**Gambar 3.28.** Penandaan kode sampel pada *billet*. (a) *Stamping punch*. (b) Proses penandaan dengan menggunakan *stamping punch*.



**Gambar 3.29.** Berturut-turut dari kiri ke kanan adalah *residue*, kupon parameter proses, dan *billet* paduan Al-Zn-Mg-Cu akan dimasukkan ke dalam satu kantong plastik dan diberi label.

### 3.4 Homogenisasi Paduan Al-Zn-Mg-Cu

Proses homogenisasi dilakukan untuk penyeragaman butir dan fasa pada produk cor. Homogenisasi paduan Al-Zn-Mg-Cu dalam penelitian ini dilakukan pada temperatur 500 °C selama 24 jam dengan menggunakan *muffle furnace* Ceramic Engineering. Setelah homogenisasi, *billet* dicelup di dalam air dengan dengan temperatur 18-21 °C seperti ditunjukkan pada Gambar 3.30 (b).

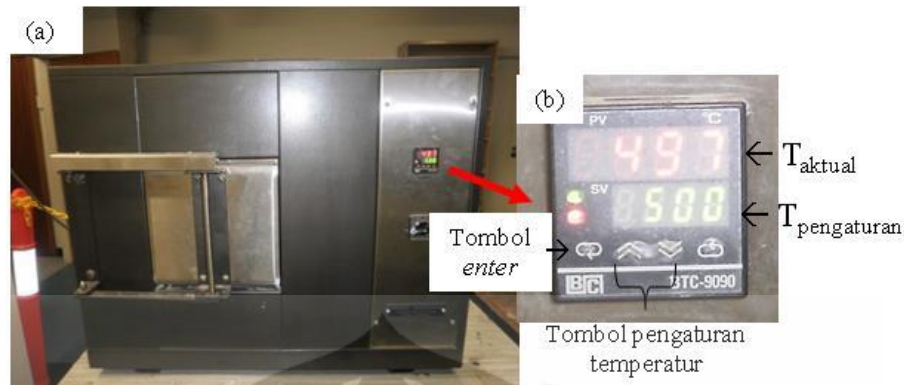


**Gambar 3.30.** (a) Peletakkan sampel pada *muffle furnace* harus diperhatikan agar tidak menyentuh *heating coil* di dalam mesin. (b) Proses *quenching* setelah homogenisasi.

Peletakkan sampel di dalam *muffle furnace* dilakukan dengan hati-hati dan seksama agar tidak menyentuh *heating coil* (yang sangat getas) di dalam mesin (lihat Gambar 3.30 (a)). Sampel diletakkan ke dalam mesin ketika temperatur masih rendah (dibawah 100 °C) baru kemudian temperatur mesin dinaikkan ke 500 °C. Jika sampel dimasukkan setelah mesin mencapai 500 °C, dapat mengakibatkan terjadinya lompatan temperatur akibat kondisi *door-open* pada saat proses peletakkan *billet*. Ketika pintu mesin ditutup (lihat Gambar 3.31 (a)) generator akan memberikan daya lebih untuk menaikkan temperatur sesuai pengaturan awal, yang dapat mengakibatkan lompatan temperatur. Besarnya nilai lompatan temperatur ini tergantung pada *gap* antara temperatur aktual sebelum pintu dibuka dan nilai pengaturan awal yang diinginkan. Semakin besar *gap* atau perbedaan nilainya, maka akan semakin besar kemungkinan lompatan temperatur yang terjadi. Hal ini berbahaya karena jika kenaikan temperatur melampaui titik lebur paduan, maka dapat terjadi *re-melting billet*.

Pengaturan temperatur pada *muffle furnace* dilakukan dengan menekan tombol panah atas atau bawah pada panel kontrol mesin. Setelah tampilan temperatur pengaturan (bagian bawah *display temperature* pada Gambar 3.31 (b)) sesuai dengan nilai yang diinginkan selanjutnya dilakukan penekanan dan *holding* tombol *enter* selama 6-8 detik. Selanjutnya lampu indikator pada panel kontrol akan berkedip-kedip dan temperatur aktual (bagian atas *display temperature* pada Gambar 3.31 (b)) akan naik.

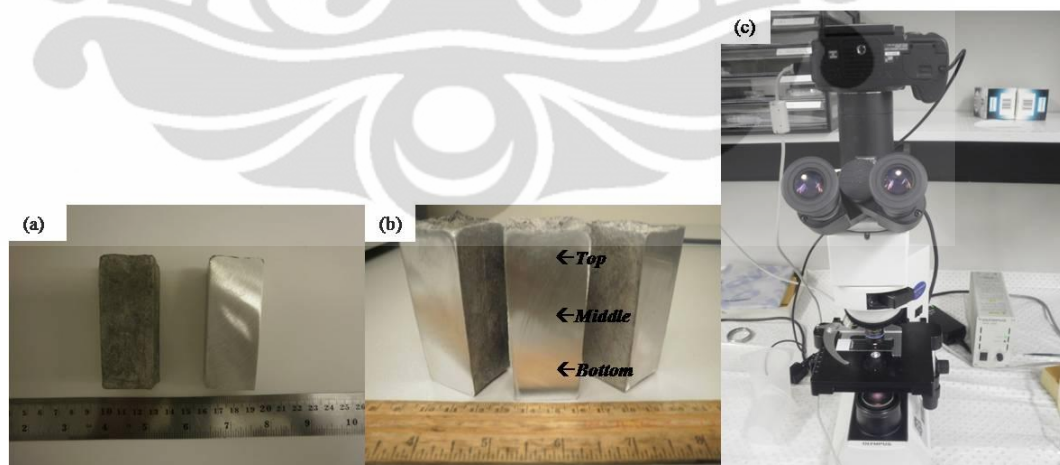




Gambar 3.31. (a) Kondisi pintu *muffle furnace* tertutup. (b) Panel kontrol mesin.

### 3.5 Pengamatan Mikrostruktur *as Cast* pada Beberapa Sampel

Pengamatan mikrostruktur *as cast* dilakukan pada beberapa sampel untuk pengecekan kualitas pengecoran dan cacat pengecoran yang mungkin terjadi. Sampel yang digunakan untuk pengamatan mikrostruktur ini merupakan *billet* setelah homogenisasi. Persiapan sampel dilakukan pada salah satu permukaan *billet* dengan melakukan *grinding* dan dilanjutkan *polishing* dengan alumina sampai diperoleh permukaan yang dapat memantulkan cahaya dan siap untuk diamati di bawah mikroskop optik (lihat Gambar 3.32 (a) dan (b)). Terdapat tiga titik pada *billet* yang perlu diamati mikrostrukturnya yaitu bagian *top*, *middle*, dan *bottom* seperti ditunjukkan pada Gambar 3.32 (b).



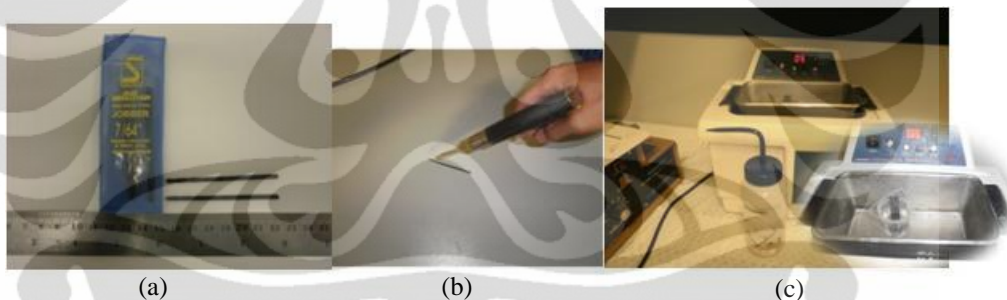
Gambar 3.32. (a) *Billet* sebelum (kiri) dan sesudah *grinding* (kanan). (b) *Billet* setelah *polishing*.  
(c) Mikroskop optik Olympus TH 4-200.



### 3.6 Pengujian Komposisi Sampel

#### 3.6.1 Persiapan Pengambilan Sampel Uji Komposisi

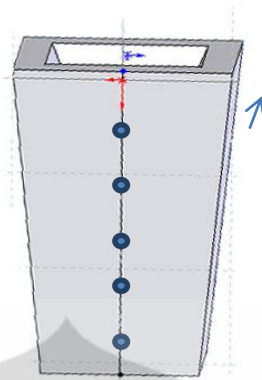
Permukaan *billet* yang sudah di-*grinding* seperti ditunjukkan pada Gambar 3.32 (a) merupakan sampel siap bor untuk pengambilan sampel uji komposisi. Peralatan lain yang perlu disiapkan adalah *driller bit 7/64* ” Blue Bullet High Steel Jobber (lihat Gambar 3.33 (a)). *Driller bit* (mata bor) disiapkan sedemikian rupa agar permukaannya bersih dari pengotor seperti oli atau sisa *swarf* pengeboran sebelumnya. Proses pembersihan mata bor dilakukan menggunakan *steam* tekanan udara (lihat Gambar 3.33 (b)) dilanjutkan dengan Bransonic *degassing machine* 2510 (lihat Gambar 3.33 (c)). Pembersihan dengan alat ini menggunakan prinsip getaran mesin dimana mata bor berada di dalam *beaker* plastik berisi larutan ethanol. Proses ini berlangsung selama  $\pm 5$  menit yang kemudian dilanjutkan dengan pembersihan dengan *steam* tekanan udara kembali untuk benar-benar memastikan tidak ada pengotor yang tertinggal pada mata bor, karena dapat mempengaruhi hasil pengujian komposisi.



**Gambar 3.33.** (a) *Driller bit 7/64* ” Blue Bullet High Steel Jobber. (b) Proses pembersihan *driller bit* dengan *steam* udara. (c) Proses pembersihan *driller bit* dengan Bransonic *degassing machine* 2510.

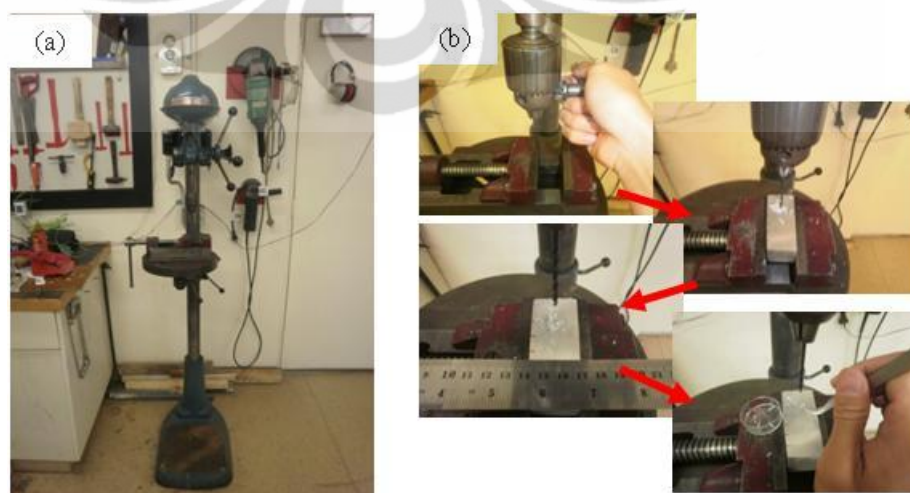
#### 3.6.2 Pengeboran *Billet* untuk Pengambilan Sampel Uji Komposisi

Berdasarkan ASTM E 88 - 91 “*Standard Practice for Sampling Nonferrous Metals and Alloys in Cast Form for Determination of Chemical Composition*” persiapan sampel untuk pengujian komposisi kimia dilakukan dengan pengeboran pada lima titik berbeda dengan jarak yang sama melalui area tepi sampel ke tengah atau keseluruhan *cross section*<sup>[69]</sup>. Pengeboran yang dilakukan pada *billet* ditunjukkan secara skematis pada Gambar 3.34.

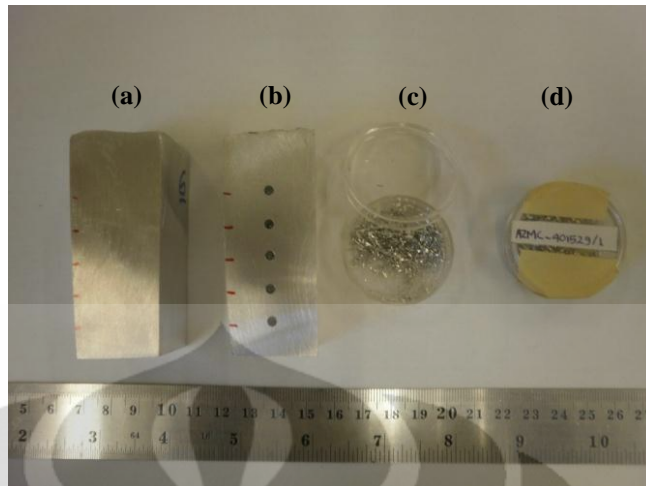


**Gambar 3.34.** Pengambilan sampel uji komposisi kimia berdasarkan standar ASTM E 88 - 91.

Proses pengeboran dilakukan dengan menggunakan mesin bor *Waldown D-10 type 8 SN Series III* kapasitas  $\frac{1}{2}$  " IN *steel* seperti ditunjukkan pada Gambar 3.35 (a) dan (b). Pemberian tekanan selama proses pengeboran tidak boleh terlalu tinggi untuk menjaga komposisi Zn yang dapat terpengaruh akibat panas friksi. *Swarf* atau *debris* hasil pengeboran dikumpulkan dengan hati-hati menggunakan pinset untuk kemudian dimasukkan pada wadah steril Jet Biofil, *tissue culture dishes* TCD-010-035 (diameter 32.8 mm, dimensi  $12.5 \times 37.8$  mm). Selanjutnya wadah ditutup dan di-*selotape* kemudian diberi nama sesuai dengan kode paduannya. *Billet* sebelum dan setelah pengeboran serta proses penyimpanan dan pelabelan *swarf* berturut-turut ditunjukkan pada Gambar 3.36 (a), (b), (c) dan (d). Selanjutnya sampel dikirim ke Analytical Centre The University of New South Wales, Australia untuk dilakukan pengujian komposisi kimia. Hasil pengujian komposisi kimia dapat dilihat pada Lampiran 2.



**Gambar 3.35.** (a) Mesin bor *Waldown D-10 type 8 SN Series III* kapasitas  $\frac{1}{2}$  " IN *steel*. (b) Proses pengeboran sampel untuk pengambilan sampel uji komposisi kimia.

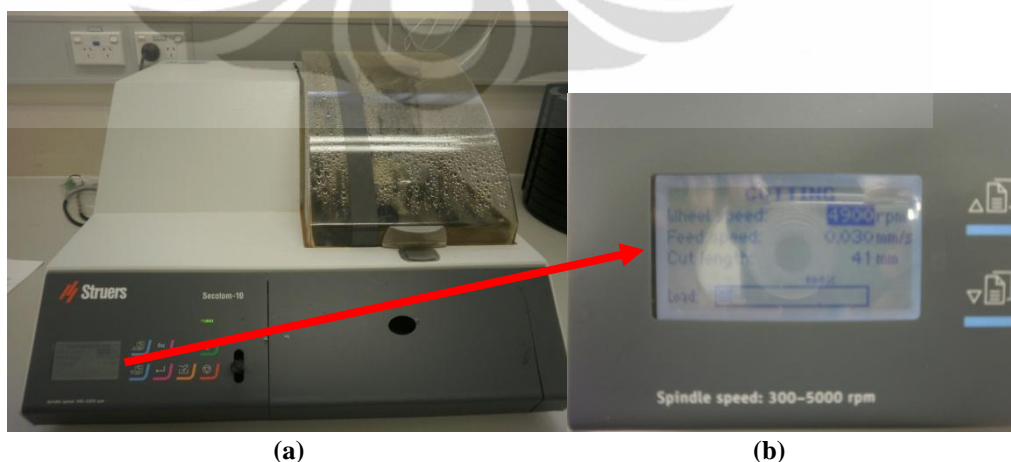


**Gambar 3.36.** (a) (b) (c) dan (d) berturut-turut adalah *billet* sebelum dan setelah pengeboran serta proses penyimpanan dan pelabelan *swarf*.

### 3.7 Pengerolan Panas

#### 3.7.1 Pemotongan *Billet* untuk Pengerolan

Ketebalan material yang digunakan untuk proses pengerolan adalah seperempat bagian dari *billet* paduan Al-Zn-Mg-Cu. Setelah *billet* dibelah menjadi seperempat, selanjutnya dipotong menjadi dua bagian yang sama yaitu bagian atas (dekat area *shrinkage*) dan bagian dasar. Pemotongan *billet* dilakukan menggunakan mesin potong Struers Secotom-10 seperti ditunjukkan pada Gambar 3.37 (a) namun dengan gerinda dan parameter yang berbeda. Percobaan untuk menentukan parameter mesin dan gerinda yang sesuai perlu dilakukan karena setiap material atau paduan memiliki sifat mekanis yang berbeda.



**Gambar 3.37.** (a) Mesin potong Struers Secotom-10 (yang sedang beroperasi). (b) Tampilan parameter proses pada mesin yang perlu diperhatikan.

Gerinda yang dapat digunakan terdiri dari dua macam yaitu:

- a. Silikon karbida Struers 10S20: untuk memotong material *non-ferrous* (dengan kekerasan 70-400 HV). Ukuran gerinda ini adalah 203 mm (diameter luar)  $\times$  0.8 mm (tebal)  $\times$  22 mm (diameter dalam).
- b. Aluminium oksida Struers 50A20: untuk memotong material *ferrous* (dengan kekerasan  $>$  400 HV). Ukuran gerinda ini adalah 200 mm (diameter luar)  $\times$  0.8 mm (tebal)  $\times$  22 mm (diameter dalam).

Pada aplikasinya, gerinda yang digunakan untuk memotong paduan Al-Zn-Mg-Cu adalah aluminium oksida Struers 50A20. Hal ini dikarenakan paduan Al-Zn-Mg-Cu sudah cukup keras dan dapat menimbulkan aus yang lebih besar jika dipotong dengan menggunakan gerinda silikon karbida Struers 10S20. Parameter mesin yang perlu diperhatikan pada proses pemotongan (lihat Gambar 3.37 (b)) adalah sebagai berikut:

- a. *Wheel speed* atau kecepatan putaran gerinda per menit. Parameter ini berhubungan dengan kekerasan material yang akan dipotong. Semakin keras material yang akan dipotong, maka kecepatan putar yang dibutuhkan tidak terlalu tinggi (berkisar antara 2000-2400 rpm). Namun jika materialnya ulet, seperti *ingot* aluminium, maka dibutuhkan kecepatan putaran yang lebih tinggi (4700-4900 rpm) untuk menghindari terjepitnya gerinda pada saat pemotongan. Kecepatan putar maksimum pada mesin potong Struers Secotom-10 adalah 5000 rpm.
- b. *Feed speed* atau kecepatan umpan merepresentasikan besarnya gaya dorong mesin dalam proses pemotongan. Nilai *feed speed* pada mesin Struers Secotom-10 dapat diatur dari 0.005 mm/s sampai dengan 1 mm/s. Semakin besar nilai *feed speed* maka akan semakin besar gaya dorong mesin yang diberikan dalam proses pemotongan. Nilai *feed speed* biasanya berhubungan dengan parameter sebelumnya (*wheel speed*). Jika *wheel speed* yang diberikan tidak dapat terlalu besar maka *feed speed* yang dapat diberikan juga terbatas, karena gaya dorong yang terlalu besar dapat mengakibatkan gerinda patah dan temperatur air pendingin yang digunakan selama proses pemotongan menjadi cepat naik.

Perpaduan antara kedua parameter tersebut akan memberikan nilai beban (*load*) pada mesin. Jika beban terlalu besar (lebih dari 80 %), sebaiknya proses pemotongan dihentikan dengan menekan tombol *stop* (lihat Gambar 3.37 (a)) dan perlu disesuaikan kembali kombinasi pengaturan parameter *wheel speed* dan *feed speed* mesin. Secara umum perbedaan proses pemotongan *ingot* aluminium dan paduan Al-Zn-Mg-Cu dengan menggunakan mesin potong Struers Secotom-10 dijelaskan pada Tabel 3.4.

**Tabel 3.4.** Perbedaan parameter pemotongan *ingot* aluminium dan paduan Al-Zn-Mg-Cu.

Pembeda	Pemotongan <i>ingot</i> Aluminium	Pemotongan paduan Al-Zn-Mg-Cu
Gerinda	Silikon karbida Struers 10S20	Aluminium oksida Struers 50A20
<i>Wheel speed</i>	4700-4900 rpm	2100-2200 rpm
<i>Feed speed</i>	0.085-0.095 mm/s	0.03-0.035 mm/s

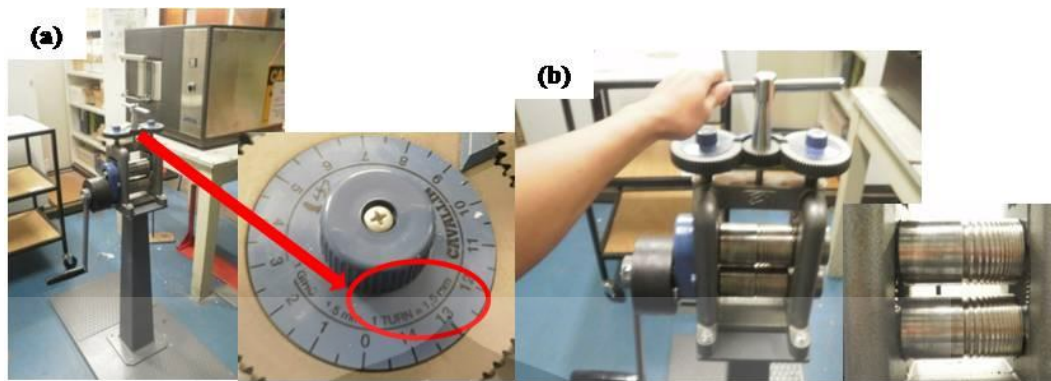
### 3.7.2 Preheating Sampel dan Roll Mill

Pemanasan awal sampel dilakukan dengan menggunakan *muffle furnace* Ceramic Engineering pada temperatur 290-430 °C selama  $\pm$  1 jam. Proses ini bertujuan untuk meningkatkan *vacancies* yang dapat melunakkan material sehingga mempermudah deformasi. *Preheating roll mill* dilakukan dengan menggunakan *heat gun* sampai mencapai temperatur sekitar 70-80 °C untuk mencegah penyerapan panas dari sampel yang terlalu tinggi.

### 3.7.3 Proses Pengerolan Panas

Proses pengerolan panas paduan Al-Zn-Mg-Cu pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan alat rol manual merk Cavallin (lihat Gambar 3.38 (a)). Pengaturan celah rol dilakukan dengan memutar tuas yang dapat menaikkan dan menurunkan *roll mill* bagian atas (lihat Gambar 3.38 (b)). Skala pada roda gigi pemutar (lihat perbesaran Gambar 3.38 (a)) dapat diatur dimana satu putaran penuh sama dengan 1.5 mm perubahan celah rol.





**Gambar 3.38.** (a) Alat rol manual merk Cavallin, bagian yang diperbesar menunjukkan skala pengaturan celah rol pada roda gigi pemutar. (b) Pengaturan celah rol.

Jarak celah pertama dalam setiap proses pengerolan dilakukan dengan menyamakan ketebalan sampel (celah rol sama dengan bagian paling tebal sampel). Hal ini dilakukan untuk menghindari deformasi tiba-tiba yang berlebihan yang dapat mengakibatkan keretakan pada sampel. Pada setiap laluan berikutnya, celah rol diturunkan sejauh 0.05 mm sampai temperatur sampel turun kira-kira menjadi 30-40 °C. Kemudian sampel dipanaskan kembali di dalam *muffle furnace* selama  $\pm 15$  menit pada temperatur 290-430 °C. Jika temperatur *roll mill* juga sudah menurun, maka dilakukan kembali *preheating* seperti dijelaskan pada butir 3.7.2. Keseluruhan proses *preheating*-pengerolan-pemanasan kembali ini disebut dengan satu *cycle*. Pada setiap *cycle* didalamnya bisa terdapat 8-10 laluan tergantung pada temperatur dan keadaan sampel. Arah masuk sampel dibuat berbeda (diputar 180°) pada setiap laluannya.

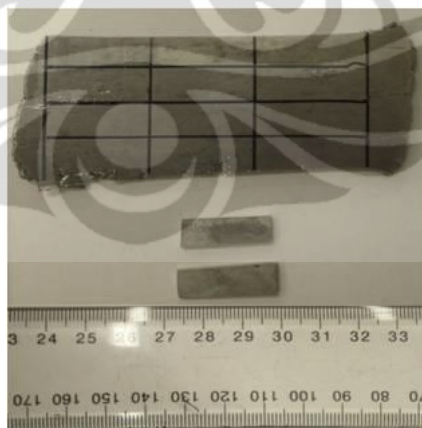
Proses pengerolan dilakukan terhadap setengah dari  $\frac{1}{4}$  bagian *billet* (dengan ketebalan awal rata-rata 2.74 mm) hingga mencapai ketebalan rata-rata 1.7-2 mm. Proses deformasi ini biasanya selesai dilakukan dalam 3 *cycle*. Dimana pada *cycle* terakhir dalam setiap laluan, dilakukan deformasi sebesar-besarnya (pengaturan celah rol dapat mencapai 0.3 mm) untuk memaksimalkan reduksi, hingga dicapai ketebalan akhir yang diinginkan. Proses deformasi yang besar mulai dilakukan pada *cycle* terakhir, karena pada kondisi ini material sudah siap menerima reduksi maksimum tanpa mengalami keretakan.

### 3.7.4 Pemotongan Pelat Hasil Rol

Pemotongan pelat hasil pengerolan dilakukan secara manual dengan menggunakan gergaji tangan. Perubahan dimensi dan deformasi dari *billet* sampai menjadi pelat ditunjukkan pada Gambar 3.39. Pelat dipotong kecil dengan ukuran  $6 \times 20$  mm untuk digunakan sebagai sampel perlakuan panas pada proses berikutnya. Ukuran pelat hasil rol bervariasi, tergantung pada dimensi awal dan proses pengerolannya. Umumnya dari satu pelat hasil pengerolan dapat dihasilkan 9-16 potongan sampel berdimensi  $\pm 6 \times 20$  mm seperti ditunjukkan pada Gambar 3.40.



**Gambar 3.39.** Perubahan dimensi dan deformasi dari *billet* sampai menjadi pelat.



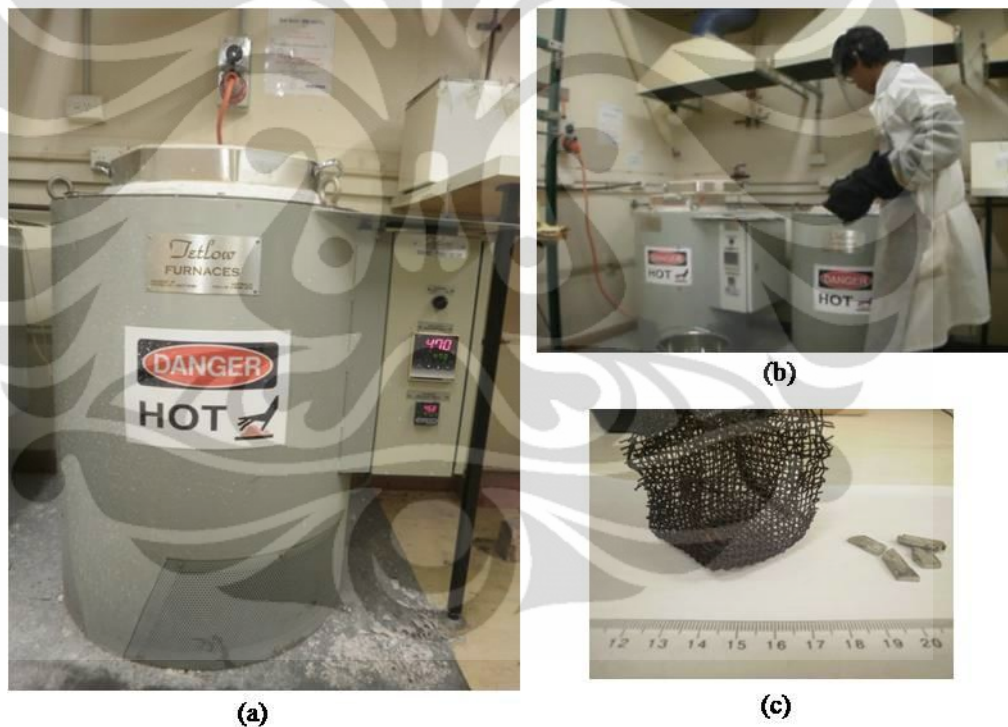
**Gambar 3.40.** Pelat hasil pengerolan dipotong menjadi spesimen *heat treatment* dengan dimensi  $\pm 6 \times 20$  mm.

### 3.8 Perlakuan Panas Paduan Al-Zn-Mg-Cu

Paduan Al-Zn-Mg-Cu merupakan salah satu paduan aluminium yang *heat treatable*<sup>[37]</sup>. Perlakuan panas paduan Al-Zn-Mg-Cu yang dilakukan pada penelitian ini adalah T6 (*solution heat treated and artificially aged*).

#### 3.8.1 Solution Treatment pada Salth Bath

Proses *solution treatment* dilakukan pada *salt bath* Jetlow Furnace (maksimum  $T = 560\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) seperti ditunjukkan pada Gambar 3.41 (a). Sebelumnya, seluruh sampel (satu jenis komposisi) dimasukkan ke dalam wadah keranjang yang terbuat dari kawat baja (lihat Gambar 3.41 (c)). Berdasarkan studi literatur pada jenis material yang sama, proses ini dilakukan pada temperatur  $470\text{ }^{\circ}\text{C}$  selama 1.5 jam.



**Gambar 3.41.** (a) *Salth bath* Jetlow Furnace. (b) Permakaian alat pelindung diri pada saat bekerja di area *salth bath*. (c) Wadah keranjang dari kawat baja untuk penempatan sampel pada *salth bath*.

Peletakkan sampel (di dalam wadah keranjang) ke dalam *salth bath* harus dilakukan dengan hati-hati. Alat pelindung diri meliputi *welder's apron*, *welder's gloves*, *sleeves*, *full face shield* harus digunakan selama proses kerja dengan di area *salth bath* seperti ditunjukkan pada Gambar 3.41 (b). Keranjang wadah diikat dengan kawat dan dikaitkan pada batang baja yang melintang tepat di atas *salth*



*bath*. Pengaitan ini harus dilakukan dengan hati-hati jangan sampai terlibat dengan *thermocouple* yang ada di dalam mesin.

### 3.8.2 Quenching dengan Air

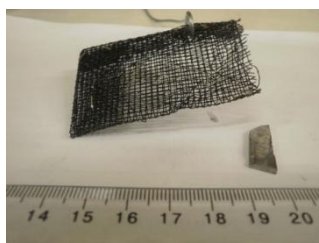
Selama proses tunggu *solution treatment*, dilakukan persiapan teknis sebagai berikut:

- a. Menyiapkan ember baja berisi air (dengan temperatur sekitar 18-21 °C) di dekat *salth bath*. Umumnya selalu tersedia ember baja berisi air di sekitar *salth bath*, namun perlu untuk selalu dicek suhu dan kebersihannya karena biasanya sudah terpakai beberapa kali untuk *quench* dari *oil bath*.
- b. Menyiapkan *liquid nitrogen* ( $T \cong -180$  °C) atau *dry ice* ( $T \cong -80$  °C) (lihat Gambar 3.42 (a) dan (b)) untuk tempat penyimpanan sampel sementara sebelum dilakukan proses selanjutnya seperti *ageing* pada *oil bath*, pengujian kekerasan (sampel *as quench*) atau penyimpanan akhir sampel pada *freezer*. Kondisi sampel perlu dijaga sedemikian rupa untuk dapat memberikan hasil yang representatif.



Gambar 3.42. (a) Nitrogen cair. (b) *Dry ice*.

- c. Menyiapkan wadah keranjang dari kawat aluminium (lihat Gambar 3.43) beserta labelnya untuk peletakkan sampel pada *oil bath*.



Gambar 3.43. Wadah keranjang dari aluminium *screen wire* untuk peletakkan sampel pada *oil bath*.

Proses *quenching* dilakukan sesegera mungkin dari *salth bath*, selanjutnya dipisahkan satu buah sampel untuk pengujian *as quench* dengan menguburnya di

dalam *dry ice* atau *liquid nitrogen*. *Dry ice* memiliki keunggulan lebih tahan lama jika dibandingkan dengan *liquid nitrogen* yang mudah menguap. Temperatur *dry ice* yang lebih rendah ( $T \cong -80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) juga dapat menjaga sampel dari proses *natural ageing* yang dapat mempengaruhi nilai kekerasan. Sehingga pemilihan *dry ice* lebih sering dilakukan dalam penelitian ini. Sampel dijaga sedemikian rupa kondisinya dengan begitu ketat untuk dapat mengamati proses *rapid hardening* yang terjadi pada menit awal *ageing*.

### 3.8.3 Ageing pada Oil Bath

Proses *ageing* dilakukan terhadap beberapa sampel dan pada periode tertentu untuk mendapatkan grafik nilai kekerasan vs waktu penuaan (*hardness curves*). Pada penelitian ini proses *ageing* dilakukan dengan menggunakan *oil bath* SEM (SA) PTY LTD (lihat Gambar 3.44) pada variabel temperatur  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$  (untuk 20 komposisi paduan Al-Zn-Mg-Cu) dan  $190\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Al-1.7Zn-1.7Mg-0.4 dan 0.7Cu serta Al-2.9Zn-2.9Mg-0.4 dan 0.7Cu (at. %)). Setiap sampel dimasukkan ke dalam wadah yang terbuat dari aluminium *screen wire* sebelum dimasukkan ke dalam *oil bath*.



**Gambar 3.44.** (a) *Oil bath* (tampak depan). (b) *Oil bath* (tampak atas). (c) Susunan letak *oil bath* dan *salth bath* di dalam laboratorium *heat treatment* ACMM The University of Sydney.

Oli yang digunakan pada proses *ageing* ini adalah Wacker® Silicone Fluid dimana batas pemakaiannya dapat mencapai temperatur 230 °C dalam kondisi yang tetap stabil. Hal yang perlu diperhatikan pada saat ingin merubah temperatur oli diantaranya sebagai berikut:

- a. Pastikan tutup terbuka setengahnya (sebagai tempat keluarnya uap yang akan dihisap oleh *exhaust*).
- b. Perubahan dari 90 °C ke 150 °C dapat dilakukan dalam satu tahap dengan waktu tunggu  $\pm$  10 menit agar oli stabil.
- c. Perubahan dari 150 °C ke 200 °C, gunakan kenaikan temperatur maksimum 25 °C dan biarkan  $\pm$  10 menit pada setiap jeda.
- d. Perubahan setelah 200 °C, gunakan kenaikan temperatur maksimum 10 °C dan biarkan  $\pm$  10 menit pada setiap jeda.
- e. Kembalikan ke temperatur 90 °C jika oli tidak digunakan.

Dari petunjuk tersebut dapat diketahui bahwa, hal pertama yang harus dilakukan sebelum memulai keseluruhan rangkaian proses perlakuan panas *solution treatment-quenching-ageing* adalah menyiapkan temperatur *oil bath* agar stabil dan sesuai dengan nilai yang diinginkan. Dimana dalam aplikasinya, paling tidak dibutuhkan waktu satu hari untuk melakukan persiapan sebelum memulai rangkaian proses perlakuan panas. Hal lain yang perlu diperhatikan adalah pengecekan temperatur *oil bath* perlu dilakukan setiap harinya. Walaupun oli ini termasuk jenis yang cukup stabil, namun untuk memastikan temperaturnya tetap stabil maka pengecekan tetap dilakukan setiap sore hari.

Sampel yang sebelumnya disimpan di dalam nitrogen cair atau *dry ice*, terlebih dahulu dicelup di dalam air sebelum dimasukkan ke dalam *oil bath*. Hal ini dilakukan untuk mengembalikan kondisi sampel ke temperatur ruang sebelum dilakukan proses *ageing*. Proses *quenching* dari *oil bath* ditunjukkan pada Gambar 3.45.



**Gambar 3.45.** Proses *quenching* dari *oil bath*.

### 3.9 Karakterisasi Sampel Paduan Al-Zn-Mg-Cu

#### 3.9.1 Pengujian Kekerasan *Vickers*

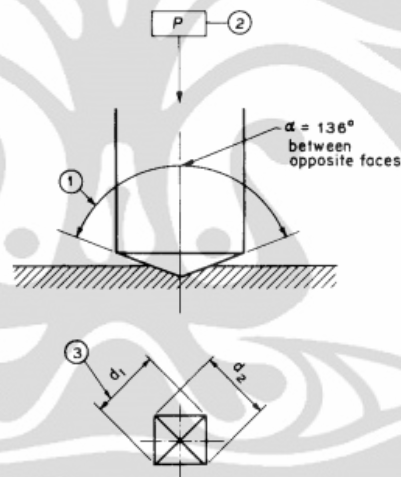
Metode pengujian ini didasarkan pada ASTM Standard E 92 (*Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials*). Pengujian dilakukan dengan menjejakkan indentor piramida ke permukaan spesimen. Jejak yang diperoleh selanjutnya diukur (lihat Gambar 3.46) dan dihitung nilai kekerasannya pada *measuring microscope* menggunakan Persamaan 3.3 di bawah ini

$$HV = 2P \sin \frac{(\alpha/2)}{d^2} = \frac{1.8544P}{d^2} \quad (3.3)$$

dimana: P = beban (kgf)

d = panjang jejak *diamond* rata-rata (mm)

$\alpha$  = sudut muka dari *diamond* ( $136^\circ$ )



Gambar 3.46. Skematik pengujian kekerasan *vickers*<sup>[70]</sup>.

##### 3.9.1.1 Persiapan Sampel untuk Pengujian Kekerasan

Permukaan sampel yang telah dicelup dari *oil bath* masih banyak mengandung oli sehingga jejak indentasinya sulit diamati pada mikroskop optik jika langsung dilakukan pengujian kekerasan. Selain itu kondisi permukaan yang terkadang menjadi kurang rata akibat proses perlakuan panas, dapat menyebabkan nilai pengukuran yang terlalu bervariasi sehingga tidak akurat untuk dijadikan data. Maka dari itu, perlu dilakukan beberapa persiapan sampel *pre-ageing* (lihat Gambar 3.47) sebelum dilakukan pengujian kekerasan, diantaranya sebagai berikut:



- a. Pembersihan permukaan sampel dengan menggunakan etanol.
- b. Pengamplasan dengan kertas amplas #2000.
- c. Pembersihan akhir dengan etanol dan kertas tisu.



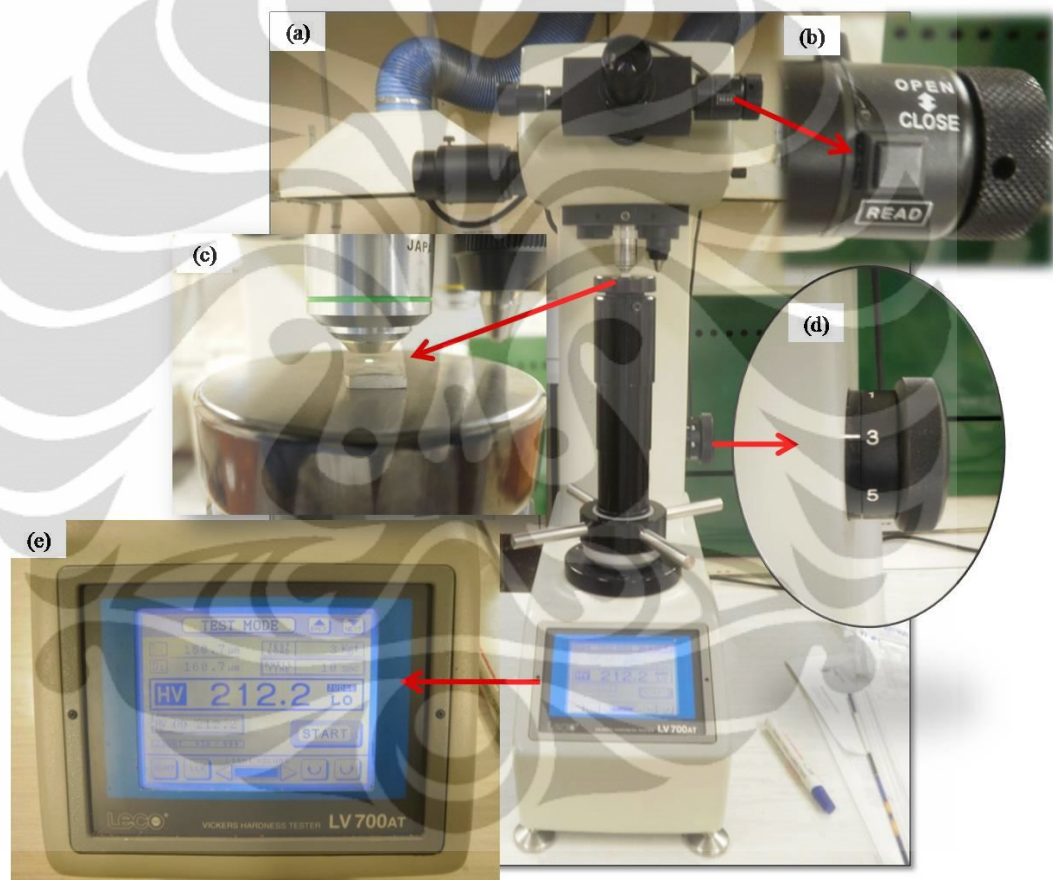
**Gambar 3.47.** Persiapan sampel *pre-ageing* sebelum pengujian kekerasan. (a) Pembersihan dengan etanol. (b) Pengamplasan dengan kertas amplas #2000.

### 3.9.1.2 Pengujian Kekerasan dengan LECO Vickers Hardness Tester LV4700<sub>AT</sub>

Tingkat respon terhadap pengerasan penuaan (*age hardening*) dari paduan eksperimen dimonitor melalui pengujian kekerasan metode Vickers menggunakan LECO Vickers Hardness Tester LV700<sub>AT</sub> dengan beban 3 kgf dan waktu indentasi (*dwell time*) selama 10 detik. Pengujian ini dilakukan untuk mengukur nilai kekerasan pada area yang sempit dan spesifik dari spesimen. Guna memperoleh hasil yang representatif, nilai kekerasan rata-rata untuk setiap variabel waktu didasarkan pada hasil pengukuran 10 indentasi. Nilai pengujian yang diambil untuk membuat grafik kekerasan vs waktu *ageing* adalah 8 data terbaik yang diperoleh dengan menghilangkan data nilai kekerasan tertinggi dan terendah (lihat Lampiran 5).

LECO Vickers Hardness Tester LV700<sub>AT</sub> (lihat Gambar 3.48 (a)) bekerja secara otomatis untuk memberikan penjejak dan penghitungan nilai indentasi. Operator mesin hanya perlu meletakkan sampel di bawah indenter, mengatur fokus dan beban, serta menentukan persinggungan jejak indentasi dengan garis skala pengukur di bawah mikroskop optik. Dari persinggungan sudut-sudut indentasi dengan garis skala ukur mikroskop (dengan menekan tombol *read* seperti ditunjukkan pada Gambar 3.48(b)), akan didapatkan nilai  $d_1$  dan  $d_2$  yang

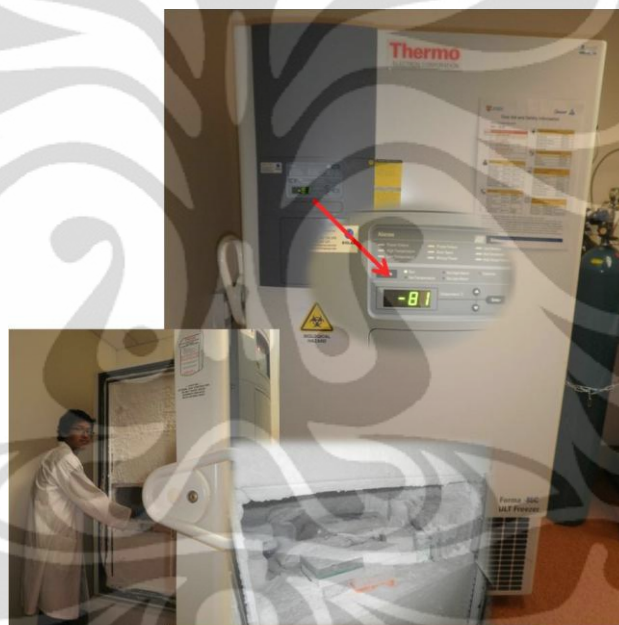
akan dinyatakan sebagai panjang jejak *diamond* rata-rata (d). Beberapa pengaturan dan nilai kekerasan ditampilkan pada *display* mesin seperti ditunjukkan pada Gambar 3.48 (e). Pengaturan fokus dilakukan dengan menyesuaikan jarak antara sampel dengan lensa menggunakan tuas yang dapat menaikkan atau menurunkan alas indentasi, diikuti dengan pengamatan fokus sampel pada mikroskop seperti ditunjukkan pada Gambar 3.48 (c). Pengaturan beban dilakukan dengan memutar tuas sesuai dengan nilai yang diinginkan seperti ditunjukkan pada Gambar 3.48 (d).



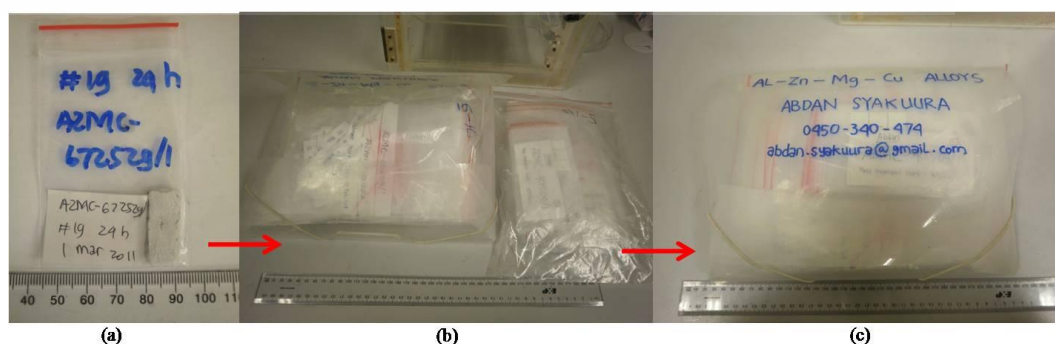
**Gambar 3.48.** (a) LECO Vickers Hardness Tester LV700<sub>AT</sub>. (b) Tombol *read* untuk membaca panjang jejak *diamond*, pada bagian ujung dapat diputar (*open* atau *close*) untuk menentukan persinggungan sudut jejak dengan garis skala pengukur pada mikroskop. (c) Pengaturan fokus sampel. (d) Pengaturan beban mesin. (e) Tampilan hasil dan *touch screen* untuk memulai penjejukan.

### 3.9.1.3 Pemberian Label dan *Storage* Sampel

Setelah pengujian kekerasan, sampel disimpan sementara, sampai nanti ditentukan proses yang akan dilakukan selanjutnya. Penyimpanan sampel dilakukan di dalam *freezer* Forma-86C pada temperatur  $-81\text{ }^{\circ}\text{C}$  seperti ditunjukkan pada Gambar 3.49. Kondisi ekstrem ini diharapkan dapat meminimalkan adanya *natural ageing* yang dapat mempengaruhi pengamatan pada karakterisasi selanjutnya. Sebelum dimasukkan ke dalam *freezer* tiap sampel diletakkan di dalam wadah plastik yang berbeda dan diberi label sesuai pengkodean, kemudian digabungkan pada satu tempat agar tidak tercecer dengan yang lainnya (lihat Gambar 3.50 (a), (b) dan (c)).



Gambar 3.49. *Freezer* Forma-86C sebagai tempat penyimpanan sampel.



Gambar 3.50. (a) Penyimpanan sampel di dalam plastik berbeda dan diberi label. (b) dan (c) Penggabungan di dalam wadah yang lebih besar agar tidak tercecer.



### 3.9.2 Pengamatan Mikrostruktur *as Heat Treatment* dan *as Rolled*

Pengamatan struktur mikro sampel *as heat treatment* dan *as rolled* dilakukan di Departemen Metalurgi dan Material FTUI. Pengamatan dilakukan menggunakan mikroskop optik merk Olympus (Gambar 3.51) untuk melihat perubahan struktur mikrohususnya perbedaan butir *as rolled*, *as heat treatment* 1 menit (*under aged*), 24 jam (*peak aged*) dan 1 minggu (*over aged*) pada temperatur 120 °C dengan perbesaran 100 X. Pengaruh komposisi paduan terhadap mikrostruktur diprediksikan tidak dapat ditentukan dengan jelas hanya melalui pengamatan dengan mikroskop optik. Sehingga sampel *as heat treatment* yang diamati pada mikroskop optik hanya berasal dari satu komposisi paduan saja, yaitu Al-1.7Zn-1.7Mg-0.4Cu (at. %). Sedangkan pengamatan mikrostruktur *as rolled* dilakukan pada sampel Al-2.9Zn-2.9Mg-0.7Cu (at. %) untuk dibandingkan dengan mikrostruktur *as cast*.

Zat etsa yang digunakan adalah Keller's *reagent* dengan keterangan sebagai berikut<sup>[71]</sup>:

- a. Komposisi kimia: 20 mL *distilled* H<sub>2</sub>O; 20 mL HNO<sub>3</sub> (70 %); 20 mL HCl (38 %); 5 mL HF.
- b. Waktu etsa: 1-3 menit.
- c. Pemakaian: Semua jenis paduan aluminium, dapat digunakan untuk mengungkap ukuran butir, arah *rolling*, area pengelasan



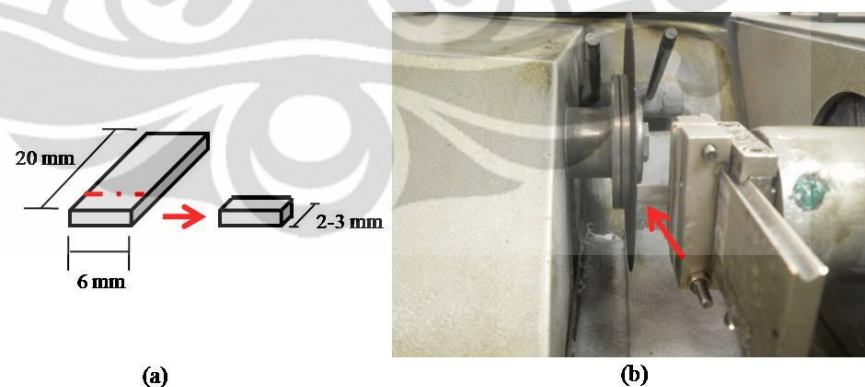
**Gambar 3.51.** Mikroskop optik di Departemen Metalurgi dan Material FTUI.

### 3.9.3 Karakterisasi dengan SEM, HRSEM dan EDS

#### 3.9.3.1 Persiapan Sampel

##### a. Cutting

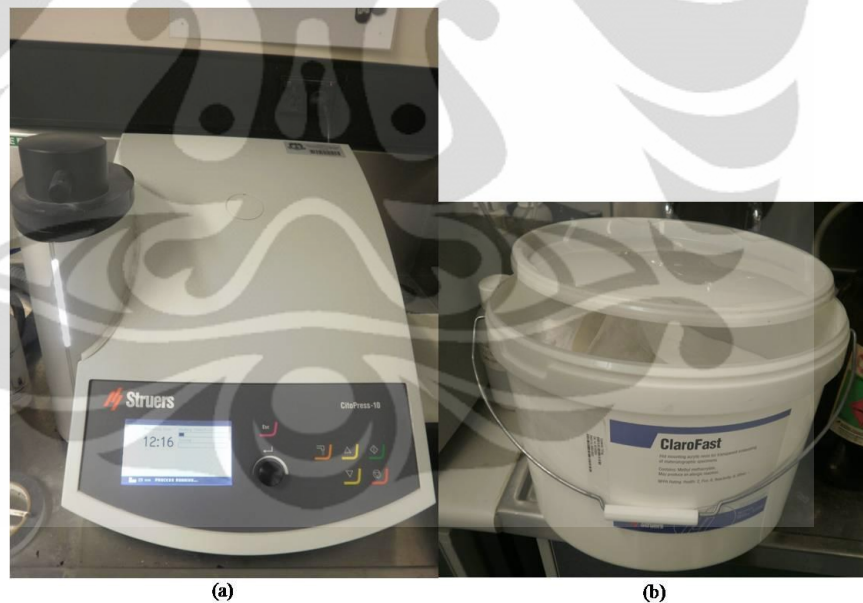
Dimensi rata-rata sampel *heat treatment* adalah  $6 \times 20$  mm. Dari sampel tersebut akan dilakukan karakterisasi pada mikroskop optik, SEM, HRSEM dan TEM. Pengamatan pada mikroskop optik, SEM dan HRSEM dapat menggunakan sampel yang sama, namun untuk pengamatan TEM perlu disiapkan beberapa sampel berbeda dari komposisi dan perlakuan yang sama untuk mendapatkan gambar terbaik sesuai dengan yang diharapkan. Selain itu persiapan sampel TEM cukup kompleks dibandingkan dengan yang lainnya, sehingga dibutuhkan jumlah sampel cadangan yang lebih banyak. Oleh karena itu perlu dilakukan pembagian atau pemotongan sampel dengan perhitungan yang baik agar jumlahnya cukup untuk beberapa karakterisasi tanpa harus mengulang proses *heat treatment* kembali. Pemotongan dilakukan dengan menggunakan mesin potong skala kecil Struers Accutom-50 ver 3.3 seperti ditunjukkan pada Gambar 3.8. Deskripsi skematis pembagian sampel *heat treatment* untuk spesimen SEM dan proses pemotongannya ditunjukkan pada Gambar 3.52 (a) dan (b).



**Gambar 3.52.** (a) Deskripsi skematis pembagian sampel *heat treatment* untuk spesimen SEM. (b) Proses pemotongan dengan menggunakan Struers Accutom-50 ver 3.3.

### b. Mounting

Sampel yang berukuran kecil atau memiliki bentuk yang tidak beraturan akan sulit untuk ditangani khususnya ketika dilakukan pengamplasan dan pemolesan akhir. Untuk memudahkan penanganannya, maka spesimen-spesimen tersebut harus ditempatkan pada suatu media (media *mounting*). Teknik *mounting* yang paling baik adalah menggunakan *thermosetting resin* dengan menggunakan material bakelit. Material ini berupa bubuk yang tersedia dengan warna yang beragam. *Thermosetting mounting* membutuhkan alat khusus, karena dibutuhkan aplikasi tekanan ( $4200 \text{ lb/in}^2$ ) dan panas ( $149 \text{ }^\circ\text{C}$ ) pada cetakan saat *mounting*. Pada penelitian ini proses *compression mounting* dilakukan menggunakan mesin Struers CitoPress-10 dengan resin akrilik ClaroFast (untuk *transparent mounting*) seperti ditunjukkan pada Gambar 3.53 (a) dan (b).



**Gambar 3.53.** (a) Mesin Struers CitoPress-10. (b) Resin akrilik ClaroFast (untuk *transparent mounting*).

### c. Grinding dan Polishing

Pengamplasan bertujuan untuk meratakan dan menghaluskan permukaan sampel dengan cara menggosokkan sampel pada kain abrasif atau kertas amplas. Pengamplasan dilakukan dengan menggunakan kertas amplas yang ukuran butir abrasifnya dinyatakan dengan *mesh*. Proses

pengamplasan sampel paduan Al-Zn-Mg-Cu yang telah di-*mounting* dilakukan secara otomatis dengan menggunakan mesin *grinding* Struers RotoPol-22 (lihat Gambar 3.54). Mesin bekerja dengan prinsip penekanan dan pemutaran sampel pada piringan yang berputar. Dalam satu proses, mesin dapat menggenggam enam buah sampel yang telah di-*mounting*. Operator hanya perlu mengganti kertas amplas dan mengatur parameter gaya tekan dan waktu proses pengamplasan. Kertas amplas yang digunakan dimulai dari *mesh* yang paling rendah yaitu #200 atau #400 (tergantung kondisi awal permukaan sampel), secara bertahap diganti sampai mencapai *mesh* yang paling tinggi yaitu #4000.

Hal yang harus diperhatikan pada saat pengamplasan adalah pemberian air. Air berfungsi sebagai pemidah geram, memperkecil kerusakan akibat panas yang timbul yang dapat merubah struktur mikro sampel dan memperpanjang masa pemakaian kertas amplas. Air yang digunakan pada pengamplasan dengan Struers RotoPol-22 dapat diatur secara otomatis tetap menyala selama proses. Hal lain yang harus diperhatikan adalah ketika melakukan perubahan arah pengamplasan, maka arah yang baru adalah  $45^\circ$  atau  $90^\circ$  terhadap arah sebelumnya. Pada mesin Struers RotoPol-22, arah putaran piringan maupun bagian penggenggam sampel dapat dirubah (searah atau berlawanan arah jarum jam) sesuai dengan keperluan.

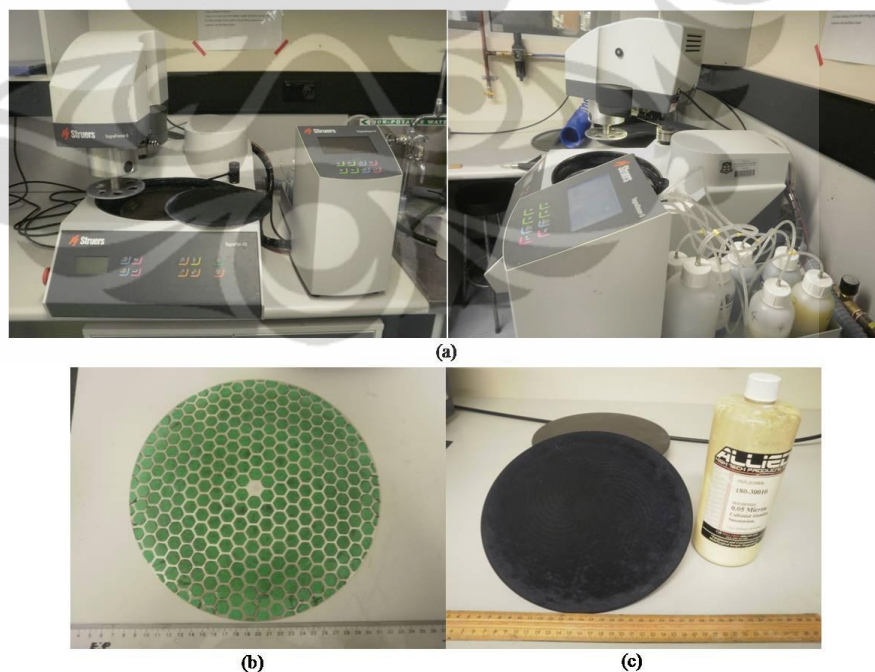


**Gambar 3.54.** Mesin *grinding* Struers RotoPol-22, disebelah kiri adalah tampak depan mesin (sedang *off*) dan disebelah kanan adalah tampak samping mesin (sedang beroperasi).



Setelah diampelas sampai halus (#4000), persiapan sampel selanjutnya adalah pemolesan. Pemolesan bertujuan untuk memperoleh permukaan sampel yang halus bebas goresan dan mengkilap seperti cermin dan menghilangkan ketidakteraturan sampel hingga orde  $0.01 \mu\text{m}$ . Permukaan sampel yang akan diamati di bawah mikroskop harus benar-benar rata. Apabila permukaan sampel kasar atau bergelombang, maka pengamatan struktur mikro akan sulit untuk dilakukan karena cahaya yang datang dari mikroskop dipantulkan secara acak oleh permukaan sampel. Pemolesan paduan Al-Zn-Mg-Cu pada penelitian ini juga dilakukan dengan mesin poles otomatis Struers TegraPol-25 (lihat Gambar 3.55(a)).

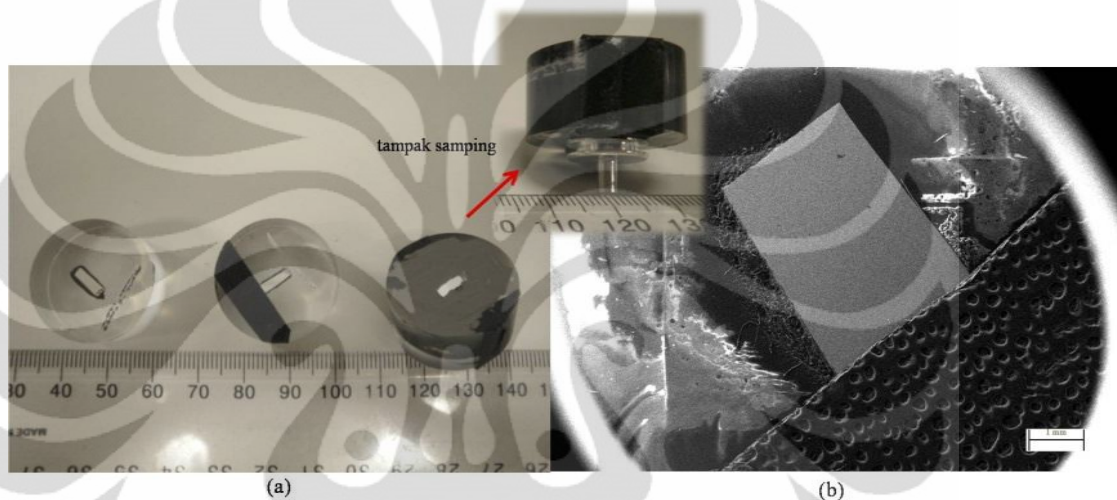
Prinsip kerja mesin ini sama dengan mesin ampelas RotoPol-22, namun mesin ini dilengkapi dengan sistem pemolesan otomatis dengan rangkaian media dan cairan poles tertentu (lihat Gambar 3.55(b) dan (c)). Media poles (pengabrasif spesimen) yang digunakan berbeda-beda tergantung dengan material yang akan dipoles. Media poles ini bersifat magnetik dengan piringan pemutar, sehingga mudah untuk melakukannya.



**Gambar 3.55.** (a) Mesin poles Struers TegraPol-25 tampak depan (foto sebelah kiri) dan tampak samping (foto sebelah kanan). (b) Media poles. (c) Media poles dan cairan poles (alumina).

#### d. Carbon coating

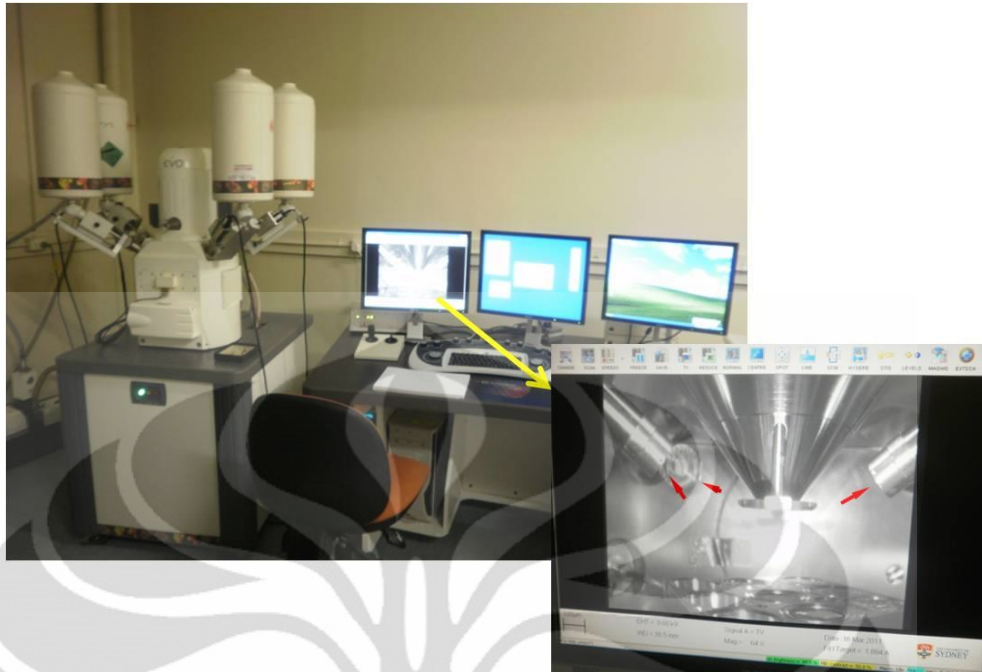
Proses *imaging* pada *scanning electron microscope* (SEM) menggunakan prinsip pemindaian elektron pada permukaan sampel. Aliran elektron dari bagian yang di-*mounting* (bersifat non-konduktif) dapat dibuat dengan memberikan *carbon* atau *silver coating* dari spesimen sampai dudukan sampel (*stab*) (lihat Gambar 3.56 (a) dan (b)). Proses *silver coating* memakan waktu lebih lama (untuk pengeringan pelarut) dibandingkan dengan *carbon coating*.



**Gambar 3.56.** (a) Dari kiri ke kanan: sampel setelah *mounting*, *grinding* dan *polishing*; *carbon coating*; *silver coating* (dan tampak samping proses *coating*). (b) *Carbon coating* di bawah pengamatan SEM.

#### 3.9.3.2 Pengamatan dengan SEM, HRSEM dan EDS

Sampel observasi SEM yang telah disiapkan diamati dengan menggunakan Carl Zeiss AG - EVO<sup>®</sup> 50 Series (dilengkapi 4 detektor EDS), *High Resolution-SEM* Zeiss ULTRA plus Gemini (dengan detektor Bruker XFlash 4010 EDS) dan LEO 420i yang berturut-turut ditunjukkan pada Gambar 3.57, 3.58 dan 3.59. Pengamatan dengan SEM LEO 420i di Departemen Metalurgi dan Material FTUI hanya dilakukan untuk sampel Al-1.7Zn-1.7Mg-1.6Cu (at. %) selama 1 minggu *ageing* pada  $T = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Sebelum dimasukkan ke dalam SEM sampel diletakkan pada dudukan spesimen yang terotomatisasi. Dudukan sampel harus selalu dijaga kebersihannya karena proses pemindaian elektron terjadi pada kondisi vakum. Tempat penyimpanan dudukan sampel ini dinamakan *desicator* yang ditunjukkan pada Gambar 3.60.



**Gambar 3.57.** SEM Carl Zeiss AG - EVO<sup>®</sup> 50 Series (dilengkapi 4 detektor EDS), bagian yang diperbesar merupakan tampilan dari CCD kamera pada area sampel, terlihat di bagian tengah dudukan sampel dan tepat di atasnya adalah *electron gun*, bagian yang ditunjuk dengan tanda panah merah adalah *X-ray detector*.



**Gambar 3.58.** High Resolution-SEM Zeiss ULTRA plus Gemini bagian yang diperbesar adalah detektor Bruker XFlash 4010 EDS.

Data yang didapatkan dari pengamatan ini diharapkan dapat menjelaskan pengaruh elemen pada paduan Al-Zn-Mg-Cu terhadap sifat mekanis dan respon terhadap perlakuan panas yang dilakukan. Dimana pengamatan dengan SEM dan HRSEM pada penelitian ini meliputi:

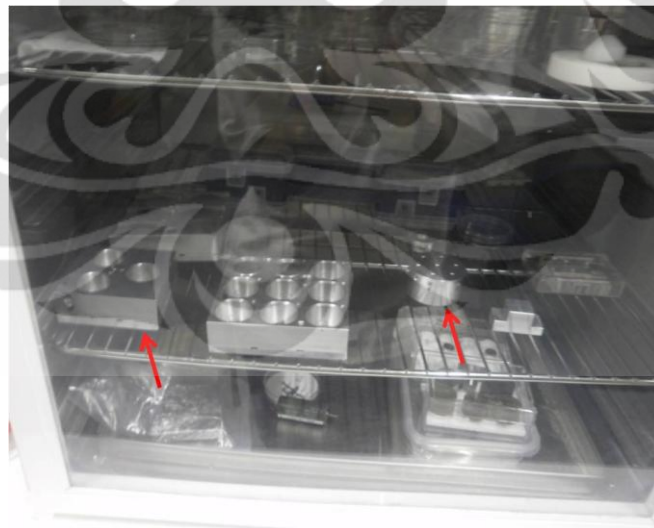
**Universitas Indonesia**



- a. Pengambilan gambar BSE (*Back Scattered Electron images*), dan SE (*Secondary Electron images*) pada perbesaran 100X sampai 3000X.
- b. Analisa distribusi elemen paduan pada struktur matriks menggunakan mode *X-Ray Mapping*.
- c. Analisa mikro komposisi fasa presipitat atau intermetalik menggunakan mode EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*).



**Gambar 3.59.** SEM LEO 420i di Departemen Metalurgi dan Material FTUI.



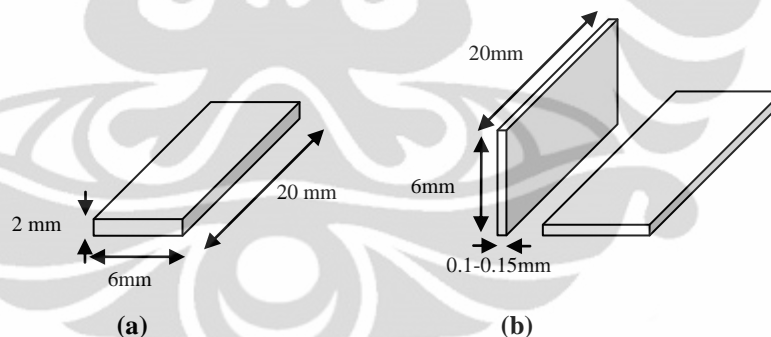
**Gambar 3.60.** *Desicator* untuk tempat penyimpanan dudukan spesimen SEM, bagian yang ditunjuk dengan tanda panah adalah dudukan yang sering digunakan.

### 3.9.4 Karakterisasi dengan *Transmission Electron Microscope* (TEM)

#### 3.9.4.1 Persiapan Sampel

##### a. Cutting dan punching

Proses pemotongan dilakukan untuk mendapatkan sampel yang cukup tipis (secara mekanik) agar memudahkan proses persiapan spesimen TEM selanjutnya. Dimensi awal sampel *heat treatment* rata-rata berkisar  $6 \times 20 \times 2$  mm (lihat Gambar 3.61 (a)). Sampel kemudian dipotong melintang dengan mesin potong Struers Accutom-50 ver 3.3 hingga diperoleh dimensi lembaran material rata-rata berkisar  $6 \times 20 \times 0.1-0.15$  mm (lihat Gambar 3.61 (b)). Pemotongan sampel dilakukan dengan menggunakan *aluminium oxide cut off wheel* 50A13 (lihat Gambar 3.62 (b)) yang bekerja pada kecepatan putaran piringan konstan 2200 rpm dan kecepatan pengumpanan 0,02 mm/s. Efek pemanasan yang timbul akibat gesekan antara piringan pemotong dengan sampel diminimalisir dengan pemberian air (terdapat sirkulasi air otomatis selama pemotongan) sebagai media pendingin secara kontinu.



**Gambar 3.61.** (a) Dimensi awal sampel *heat treatment*. (b) Sampel dipotong melintang untuk mendapatkan spesimen yang lebih tipis.

Sampel dilekatkan pada sebuah balok logam khusus dengan menggunakan Loctite 460 *instant adhesive* (waktu *curing*  $\pm 10$  menit) untuk memudahkan proses pemotongan secara melintang seperti ditunjukkan pada Gambar 3.62 (a) dan (b). Pemisahan pelat yang menempel pada balok logam dilakukan dengan memberikan *acetone*, karena Loctite 460 *instant adhesive* larut dalam *acetone*. Pelat tipis hasil pemotongan diambil dengan hati-hati agar tidak rusak karena benturan.



**Gambar 3.62.** (a) Penempelan sampel pada balok logam dengan Loctite 460 *instant adhesive*. (b) Proses pemotongan melintang dengan *aluminium oxide cut off wheel 50A13* pada mesin potong Struers Accutom-50 ver 3.3.

Setelah didapatkan pelat tipis dengan ketebalan berkisar antara 0.1-0.15 mm selanjutnya dilakukan pembuatan 3 mm *disk* dengan menggunakan pelubang mekanik Gatan *mechanical puncher* seperti ditunjukkan pada Gambar 3.63. Alat ini mampu memotong *disk* dengan tingkat kerusakan minimum di sekitar batas tepi sampel.



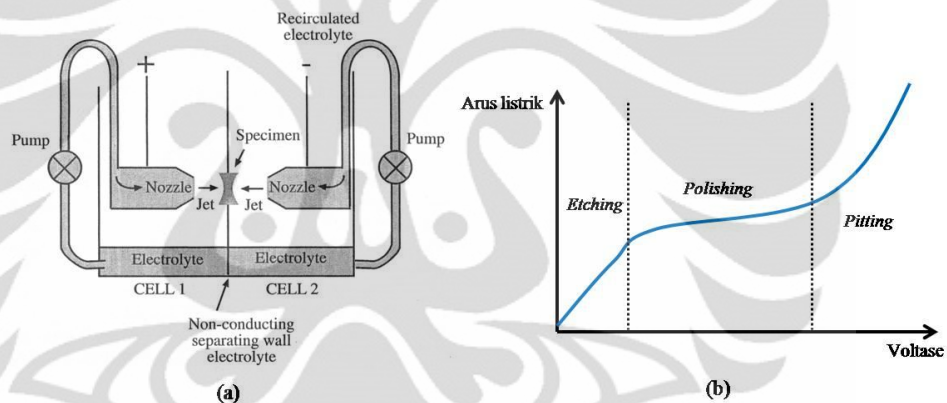
**Gambar 3.63.** Gatan *mechanical puncher* tanda panah menunjukkan tempat peletakkan lembaran sampel.

#### b. Electropolishing

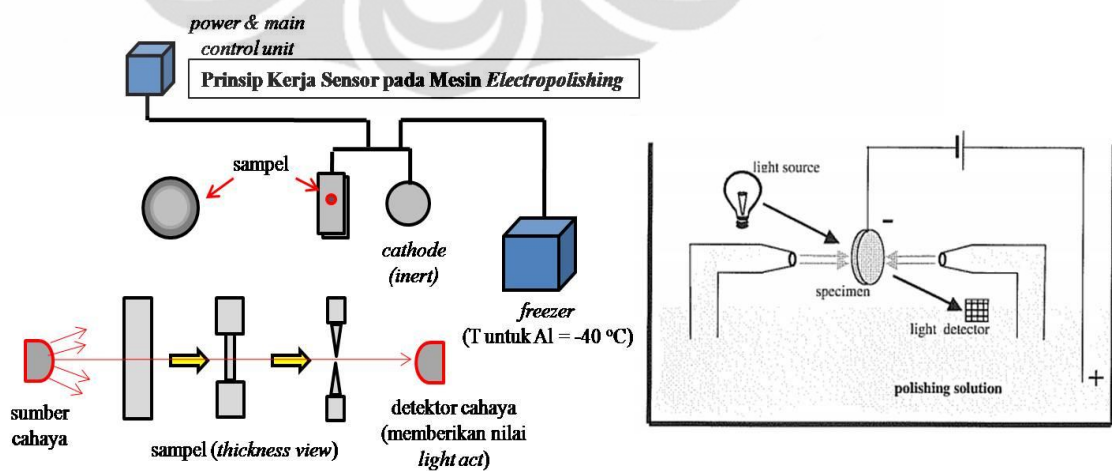
Metode preparasi sampel TEM dengan *electropolishing* hanya dapat digunakan untuk material konduktor listrik, seperti halnya logam dan paduannya. Metode ini cukup cepat dan dapat menghasilkan sampel TEM yang bersifat *electron transparent* dengan tingkat kerusakan mekanik yang sangat minimum. Prinsip *electropolishing* adalah pengaturan tegangan dan arus listrik (lihat Gambar 3.64 (a)) yang mengalir sehingga terjadi proses pelarutan anodik dari sampel oleh elektrolit yang

akan menghasilkan *polished surface* (bentuk kurva pada area *polishing* yang cenderung landai, Gambar 3.64 (b)). Peralatan *electropolisher* yang digunakan dilengkapi dengan sensor cahaya atau laser guna mendeteksi tingkat transparansi sampel. Deskripsi skematik prinsip kerja sensor cahaya dalam *electropolisher machine* ditunjukkan pada Gambar 3.65.

Apabila sampel telah membentuk lubang atau mencapai tingkat transparansi yang diinginkan, ditandai dengan peningkatan nilai sensor cahaya (*light act*) pada detektor, maka mesin akan memberikan tanda (berupa suara). Selanjutnya spesimen harus segera diangkat dan dicuci dalam larutan metanol untuk menghentikan reaksi dan mencegah hilangnya area tipis yang telah terbentuk oleh sisa elektrolit yang menempel pada sampel.



Gambar 3.64. (a) Prinsip dasar kinerja *jet electropolishing*<sup>[72]</sup>. (b) Kurva *electropolishing*<sup>[72]</sup>.



Gambar 3.65. Prinsip kerja sensor cahaya pada mesin *electropolishing*.



Proses *electropolishing* paduan Al-Zn-Mg-Cu pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan mesin Electropolishing Jet Thinner Struers Tenupol-5 seperti ditunjukkan pada Gambar 3.66 (a). Tahapan proses *electropolishing* dengan menggunakan alat ini adalah:

1. Pengisian elektrolit 30 vol. %  $\text{HNO}_3$  + 70 vol. % metanol ke dalam bak *electropolishing* seperti ditunjukkan pada Gambar 3.66 (c). Perhatikan elektrolit jangan sampai melebihi batas garis yang ada di bagian dalam bak *electropolishing*.
2. Aktifkan *cooler machine* Lauda ProLine 855 (lihat Gambar 3.66 (b)), kemudian atur temperatur dengan menekan tombol *enter* dua kali dan turunkan menjadi  $-40\text{ }^\circ\text{C}$ , lalu tekan tombol *enter* satu kali untuk konfirmasi.



**Gambar 3.66.** (a) Electropolishing Jet Thinner Struers Tenupol-5. (b) Bak *electropolishing*. (c) *Cooler machine* Lauda ProLine 855. Di tengah adalah kesatuan rangkaian mesin *electropolishing*.

3. Nyalakan mesin Electropolishing Jet Thinner Struers Tenupol-5 kemudian pilih mode pengaturan yang akan dilakukan. Dari beberapa percobaan pengaturan parameter yang sesuai untuk *electropolishing* paduan Al-Zn-Mg-Cu adalah:

- 1) *Voltage*: 16V.
- 2) Temperatur: -32 - (-38) °C.
- 3) *Light stop value*: 40.

Parameter ini dapat disimpan pada mesin untuk dapat dilakukan pada proses selanjutnya. Nilai voltase diatur dan disesuaikan sedemikian rupa (tergantung komposisi paduan) untuk mendapatkan nilai arus berkisar antara 60-100 mA yang berdasarkan pengalaman, baik untuk proses *electropolishing*.

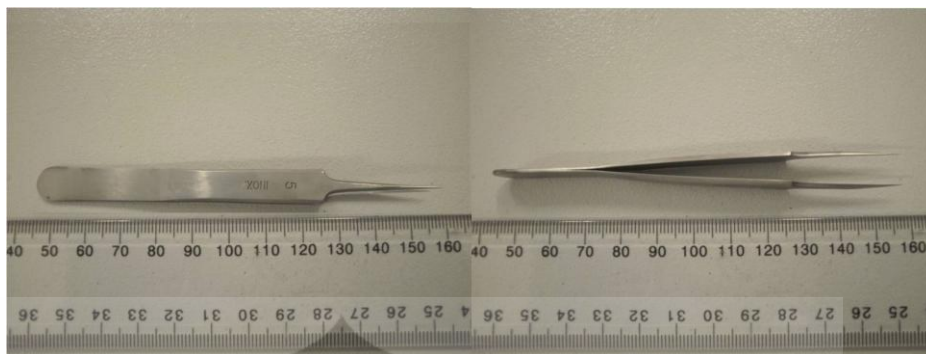
4. Pada saat mesin dalam kondisi menyala, pada tampilan dapat dilihat temperatur aktual proses. Pada saat temperatur aktual mencapai  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  dilakukan pengaktifan pompa sirkulasi (dengan menekan F2) dan meningkatkan kecepatannya (*flow rate*) menjadi 20. Hal ini dilakukan untuk menghindari pembekuan uap air yang mungkin ada dalam sistem yang dapat mengganggu proses. Pompa dibiarkan menyala selama  $\pm 10$  menit, setelah itu dapat dimatikan (setelah sistem berjalan sirkulasi aliran terotomatisasi).
5. Letakkan *disk* pada *sample holder* (lihat Gambar 3.67 (a)) dengan hati-hati menggunakan *tweezer*/pinset Inox no.5. Sebaiknya setiap operator memiliki *tweezer* sendiri karena bagian ujungnya sangat sensitif (lihat Gambar 3.68).



**Gambar 3.67.**(a) *Sample holder*. (b) Letak *sample holder* pada bak *electropolishing*.

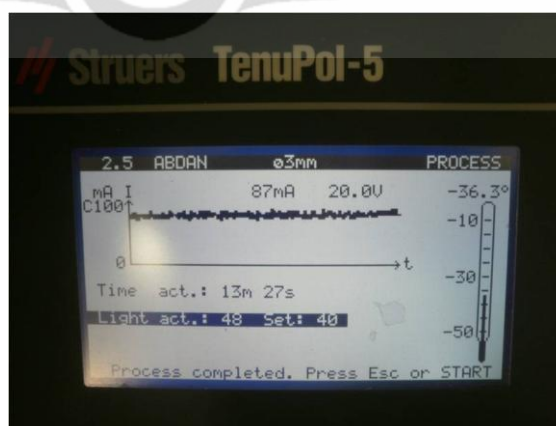
6. Selanjutnya letakkan *sample holder* pada tempatnya di bak *electropolishing* seperti ditunjukkan pada Gambar 3.67 (b).





**Gambar 3.68.** Tweezer atau pinset Inox no. 5 tampak atas (foto sebelah kiri) dan tampak samping (foto sebelah kanan).

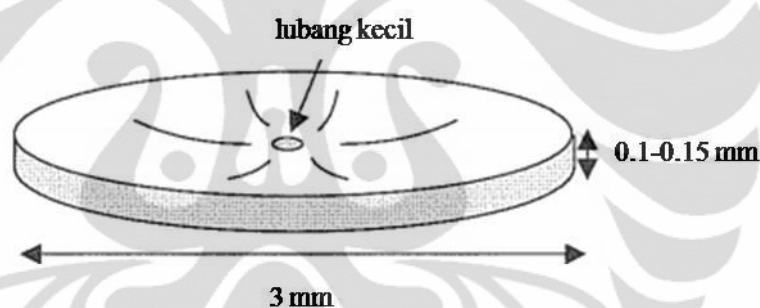
7. Awali proses *electropolishing* dengan melakukan *scanning* (tekan F1) dilanjutkan dengan *filter scan* (dengan menekan F3). Dari proses *scanning* ini didapatkan gambaran kurva *electropolishing* seperti ditunjukkan pada Gambar 3.64 (b) yang selanjutnya bisa ditentukan nilai voltase yang sesuai untuk *polishing*. Setelah menentukan voltase yang sesuai selanjutnya dilakukan *enhance scan* dengan menekan tombol F4.
8. Setelah terbentuk lubang atau tercapai tingkat transparansi yang diinginkan pada spesimen, mesin akan memberikan tanda suara. Selanjutnya dengan segera spesimen diangkat dan dicuci dalam larutan metanol untuk menghentikan reaksi dan mencegah hilangnya area tipis yang telah terbentuk oleh sisa elektrolit yang menempel pada sampel. Mesin akan menampilkan grafik dan parameter proses pada *display* seperti ditunjukkan pada Gambar 3.69.



**Gambar 3.69.** Tampilan mesin setelah proses *electropolishing* selesai.

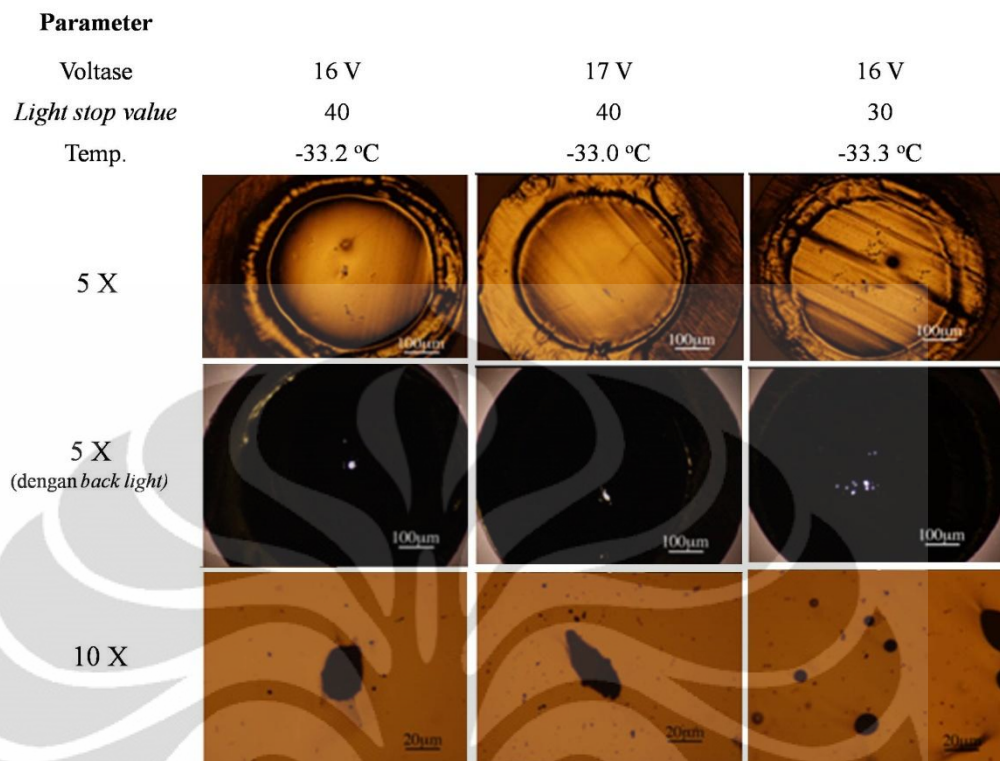
### c. Pengecekan spesimen TEM pada mikroskop optik

Pengamatan spesimen TEM pada mikroskop optik dilakukan untuk memastikan adanya daerah tipis yang transparan di sekitar lubang akibat proses *electropolishing*. Spesimen TEM yang baik memiliki satu buah lubang kecil ditengah (lihat Gambar 3.70), dan biasanya daerah transparan akan berada disekelilingnya. Pengamatan kualitas sampel dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik Olympus TH 4-200 seperti ditunjukkan pada Gambar 3.32 (c). Pengamatan dilakukan pada perbesaran 5X dan 10X. Hasil pengamatan dengan mikroskop optik ini dapat digunakan untuk analisis parameter proses terbaik untuk proses *electropolishing*. Contoh analisis foto mikro spesimen TEM paduan Al-1.7Zn-1.7Mg-1Cu (at. %) untuk mendapatkan parameter proses *electropolishing* ditunjukkan pada Gambar 3.71.



**Gambar 3.70.** Deskripsi skematik penipisan spesimen TEM, sampel yang baik memiliki satu buah lubang kecil di tengah.

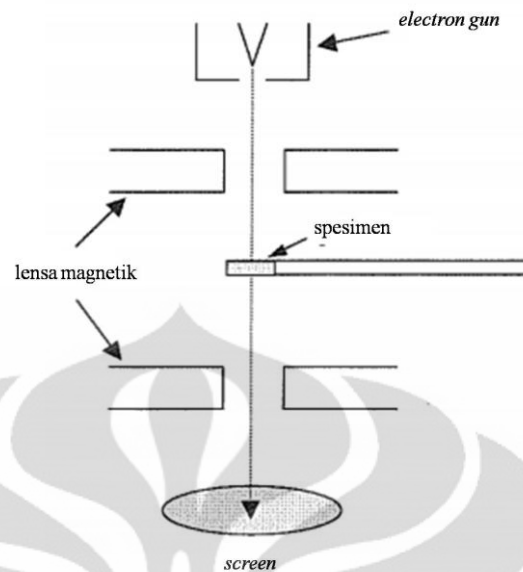
Pada Gambar 3.71 terlihat bahwa semakin besar voltase yang diberikan maka ukuran dan jumlah lubang akan semakin bertambah karena pengikisan sampel akibat reaksi *electropolishing* akan berlangsung lebih cepat. Langkah lain yang dilakukan untuk mendapatkan ukuran lubang yang minimum adalah dengan menurunkan nilai *light stop value*, namun ternyata selain ukurannya mengecil, jumlah lubang yang ada juga bertambah sehingga tidak baik untuk keadaan sampel TEM karena kemungkinan daerah yang ingin diamati terkikis. Sehingga parameter yang cocok untuk *electropolishing* paduan Al-Zn-Mg-Cu adalah pada voltase 16 V dan *light stop value* 40.



**Gambar 3.71.** Foto mikro spesimen TEM paduan Al-1.7Zn-1.7Mg-1Cu (at. %) setelah *electropolishing* pada beberapa parameter proses yang berbeda.

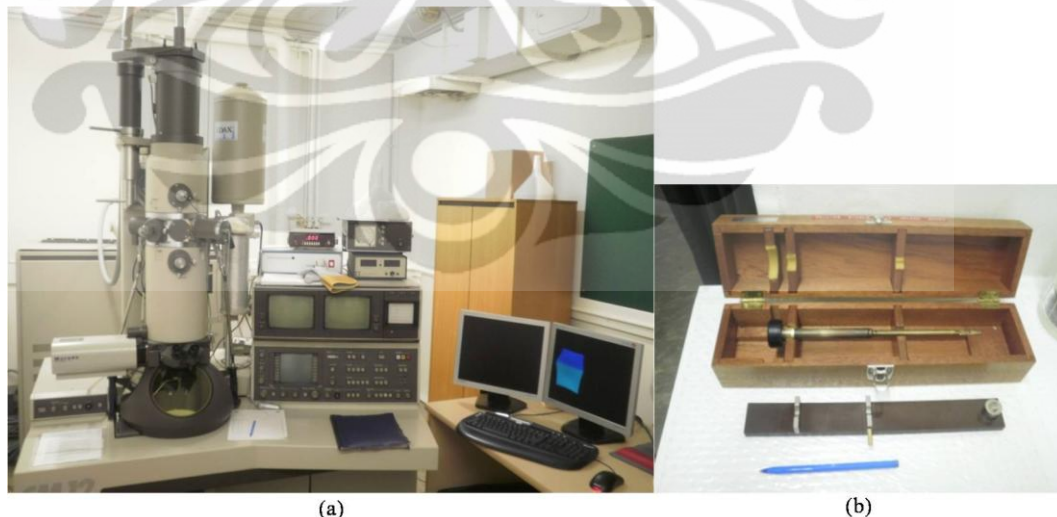
### 3.9.4.2 Pengamatan dengan TEM

*Transmission electron microscope* (TEM) digunakan untuk mempelajari mikrostruktur internal suatu material. TEM juga dapat digunakan untuk mendapatkan gambar struktur atom, untuk mempelajari distribusi komposisi dengan resolusi *spatial* yang sangat tinggi (~ 1 nm) dan untuk mengukur struktur elektron (seperti ikatan antar-atom). Oleh sebab itu kualitas sampel yang sangat baik menjadi persyaratan utama untuk mendapatkan hasil sesuai dengan yang diharapkan. Gambar 3.72 menunjukkan diagram skematis sederhana dari TEM. *Electron beam* berenergi tinggi (100-400 kV) berjalan melewati spesimen yang sangat tipis (*electron transparent*). Beberapa elektron terpencar (*scattered*) oleh spesimen, kemudian lensa yang terletak setelah spesimen digunakan untuk menampilkan gambar pada layar yang terletak di bagian bawah mikroskop.



**Gambar 3.72.** Deskripsi skematis sederhana dari *transmission electron microscope* (TEM).

Observasi struktur nano, serta pengamatan *bright field* dari fasa presipitat paduan Al-Zn-Mg-Cu pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan TEM (*Transmission Electron Microscope*) Phillips CM12 (120 kV) seperti ditunjukkan pada Gambar 3.73 (a). Pengamatan dilakukan dengan menggunakan *single tilt* (lihat Gambar Gambar 3.73 (b)) dan *double tilt sample holder* untuk dapat melihat struktur kristal dari orientasi tertentu.



**Gambar 3.73.** (a) *Transmission electron microscope* (TEM) Phillips CM12 (120 kV). (b) *Single tilt sample holder*.

## BAB 4

### ANALISIS PROSES PENGECORAN, HOMOGENISASI DAN PENGEROLAN PANAS PADUAN Al-Zn-Mg-Cu

#### 4.1 Analisis Proses Pengecoran Induksi Vakum

Proses pengecoran paduan Al-Zn-Mg-Cu dilakukan menggunakan Indutherm Vacuum Tilting Casting Machine VTC200 pada tekanan 0.001 atm dari *ingot* aluminium, seng, magnesium dan tembaga. Kemampucoran paduan Al-Zn-Mg tidak begitu baik, sehingga diperlukan teknik pengecoran yang sesuai untuk meminimalisir cacat penyusutan dan retak panas<sup>[11]</sup>. Proses peleburan akan berlangsung lebih cepat dengan teknik induksi dimana koil (yang mengelilingi *crucible*) berfungsi sebagai kumparan primer yang dialiri arus AC dan *charge material* sebagai kumparan sekunder. Arus induksi terjadi dari kumparan primer ke arah kumparan sekunder merupakan energi panas yang sanggup untuk mencairkannya dalam waktu singkat. Lingkungan vakum juga sangat baik bagi peleburan logam untuk meminimalisir adanya gas hidrogen yang dapat menyebabkan porositas pada produk cor<sup>[13]</sup>. Dengan demikian teknik pengecoran vakum paduan Al-Zn-Mg-Cu yang dilakukan sudah sesuai, dimana dapat dihasilkan *billet* dengan cacat pengecoran yang minimum.

##### 4.1.1 Analisis Persen Berat (wt. %) Elemen yang Hilang pada Proses Pengecoran

Parameter proses terutama pengaturan temperatur perlu disesuaikan mengingat pengecoran dilakukan dari *ingot* murninya. Titik lebur Cu cukup tinggi yaitu sekitar 1083 °C<sup>[12]</sup>. Nilai ini jauh lebih tinggi dibandingkan dengan titik lebur logam Zn (419.5 °C) bahkan masih diatas titik uap Zn yaitu sebesar 907 °C. Hal ini memberikan efek bahwa tidak dimungkinkan untuk melebur logam tembaga dalam membuat paduan Al-Zn-Mg-Cu dari logam murninya. Sehingga mekanisme pelarutan tembaga dalam pembuatan paduan ini adalah dengan cara difusi logam. Parameter proses pengecoran 20 paduan Al-Zn-Mg-Cu yang dilakukan pada penelitian ini dirangkum pada Tabel 4.1.



**Tabel 4.1.** Parameter proses dan persentase elemen yang hilang pada pengecoran 20 paduan Al-Zn-Mg-Cu

No	Kode Paduan (at. %)	Element Lost (%)				Holding Condition		Max T (°C)	T Pouring (°C)	Keterangan
		Al	Zn	Mg	Cu	T (°C)	t (min)			
1	Al-1.7Zn-1.7Mg-0.4Cu	1.5	5.9	5.0	4.9	715	7	840	713	
2	Al-1.7Zn-1.7Mg-0.7Cu	0.7	7.5	5.5	7.3	725	6	815	725	
3	Al-1.7Zn-1.7Mg-1.0Cu	1.3	3.4	3.4	21.1	720	5	780	729	<i>undissolved Cu: 0.49 gr</i>
3/2	Al-1.7Zn-1.7Mg-1.0Cu	-1.3	-6.1	1.7	10.4	720	8	746	727	
4	Al-1.7Zn-1.7Mg-1.3Cu	0.8	15.0	4.6	2.4	720	7	770	764	
5	Al-1.7Zn-1.7Mg-1.6Cu	0.4	16.2	10.9	12.5	750	7	753	749	
6	Al-2.1Zn-2.1Mg-0.4Cu	-0.3	12.7	4.0	4.8	750	7	823	753	
7	Al-2.1Zn-2.1Mg-0.7Cu	1.0	14.4	8.6	10.4	750	7	763	757	
8	Al-2.1Zn-2.1Mg-1.0Cu	1.0	14.7	12.0	25.4	750	7	764	757	
9	Al-2.1Zn-2.1Mg-1.3Cu	0.6	12.4	9.7	23.3	750	6	768	751	<i>undissolved Cu: 0.3722 gr</i>
9/2	Al-2.1Zn-2.1Mg-1.3Cu	0.0	-6.0	3.6	11.3	720	9	742	726	
10	Al-2.1Zn-2.1Mg-1.6Cu	2.9	15.7	10.7	13.1	750	7	772	754	
11	Al-2.5Zn-2.5Mg-0.4Cu	-1.7	13.2	9.5	12.0	750	7	766	755	
12	Al-2.5Zn-2.5Mg-0.7Cu	-0.2	13.2	10.0	14.3	750	7	763	756	
13	Al-2.5Zn-2.5Mg-1.0Cu	-0.4	-0.7	4.2	12.6	715	8	755	723	
14	Al-2.5Zn-2.5Mg-1.3Cu	-0.7	-7.9	3.7	12.3	715	9	732	724	
15	Al-2.5Zn-2.5Mg-1.6Cu	0.5	-5.7	6.9	10.8	715	10	742	723	
16	Al-2.9Zn-2.9Mg-0.4Cu	-1.1	-7.1	-0.9	12.0	715	8	736	724	
17	Al-2.9Zn-2.9Mg-0.7Cu	-1.5	-6.2	-2.4	7.9	715	8	745	728	
18	Al-2.9Zn-2.9Mg-1.0Cu	-0.4	-3.3	2.4	12.0	715	8.5	738	724	
19	Al-2.9Zn-2.9Mg-1.3Cu	-1.3	-8.6	1.5	10.0	715	9	732	723	
20	Al-2.9Zn-2.9Mg-1.6Cu	-1.7	-11.3	3.0	16.6	715	10	735	724	<i>undissolved Cu: 0.3106 gr</i>
20/2	Al-2.9Zn-2.9Mg-1.6Cu	-0.4	-5.6	3.1	10.6	725	11	737	731	

Elemen yang hilang dihitung dengan perbandingan komposisi awal pada perhitungan dengan hasil analisis komposisi kimia (ICP) yang diperoleh dari Analytical Centre The University of New South Wales. Perbandingan data perhitungan komposisi paduan awal dengan nilai yang didapatkan dari pengujian komposisi kimia (ICP) disajikan pada Tabel 4.2.



**Tabel 4.2.** Perbandingan data perhitungan komposisi paduan awal (*initial*) dengan nilai yang didapatkan dari pengujian komposisi kimia (ICP).

No	Kode Paduan (at. %)	Weight Percent (%)									
		Al		Zn		Mg		Cu		Fe	Si
		<i>Initial</i>	ICP	<i>Initial</i>	ICP	<i>Initial</i>	ICP	<i>Initial</i>	ICP	ICP	ICP
1	Al-1.7Zn-1.7Mg-0.4Cu	93.6	92.2	4.0	3.8	1.5	1.4	0.9	0.9	0.07	0.02
2	Al-1.7Zn-1.7Mg-0.7Cu	92.9	92.3	4.0	3.7	1.5	1.4	1.6	1.5	0.07	0.02
3	Al-1.7Zn-1.7Mg-1.0Cu	92.3	91.1	4.0	3.8	1.5	1.4	2.3	1.8	0.08	0.02
3/2	Al-1.7Zn-1.7Mg-1.0Cu	92.3	93.4	4.0	4.2	1.5	1.5	2.3	2.0	0.08	0.03
4	Al-1.7Zn-1.7Mg-1.3Cu	91.6	90.9	4.0	3.4	1.5	1.4	2.9	2.9	0.07	0.03
5	Al-1.7Zn-1.7Mg-1.6Cu	91.0	90.6	3.9	3.3	1.5	1.3	3.6	3.2	0.07	0.02
6	Al-2.1Zn-2.1Mg-0.4Cu	92.3	92.6	4.9	4.3	1.8	1.8	0.9	0.9	0.07	0.02
7	Al-2.1Zn-2.1Mg-0.7Cu	91.7	90.8	4.9	4.2	1.8	1.7	1.6	1.4	0.07	0.02
8	Al-2.1Zn-2.1Mg-1.0Cu	91.0	90.1	4.9	4.2	1.8	1.6	2.3	1.7	0.07	0.02
9	Al-2.1Zn-2.1Mg-1.3Cu	90.4	89.9	4.9	4.3	1.8	1.6	2.9	2.2	0.08	0.02
9/2	Al-2.1Zn-2.1Mg-1.3Cu	90.4	90.4	4.9	5.2	1.8	1.7	2.9	2.6	0.07	0.03
10	Al-2.1Zn-2.1Mg-1.6Cu	89.8	87.2	4.8	4.1	1.8	1.6	3.6	3.1	0.08	0.02
11	Al-2.5Zn-2.5Mg-0.4Cu	91.1	92.6	5.8	5.1	2.2	2.0	0.9	0.8	0.06	0.02
12	Al-2.5Zn-2.5Mg-0.7Cu	90.4	90.7	5.8	5.0	2.2	1.9	1.6	1.4	0.07	0.02
13	Al-2.5Zn-2.5Mg-1.0Cu	89.8	90.2	5.8	5.8	2.2	2.1	2.3	2.0	0.07	0.02
14	Al-2.5Zn-2.5Mg-1.3Cu	89.2	89.8	5.8	6.2	2.1	2.1	2.9	2.6	0.07	0.02
15	Al-2.5Zn-2.5Mg-1.6Cu	88.5	88.1	5.7	6.1	2.1	2.0	3.6	3.2	0.07	0.02
16	Al-2.9Zn-2.9Mg-0.4Cu	89.9	90.9	6.7	7.2	2.5	2.5	0.9	0.8	0.07	0.02
17	Al-2.9Zn-2.9Mg-0.7Cu	89.2	90.6	6.7	7.1	2.5	2.6	1.6	1.4	0.07	0.02
18	Al-2.9Zn-2.9Mg-1.0Cu	88.6	88.9	6.7	6.9	2.5	2.4	2.2	2.0	0.07	0.02
19	Al-2.9Zn-2.9Mg-1.3Cu	88.0	89.1	6.7	7.2	2.5	2.4	2.9	2.6	0.07	0.02
20	Al-2.9Zn-2.9Mg-1.6Cu	87.4	88.8	6.6	7.4	2.5	2.4	3.6	3.0	0.07	0.02
20/2	Al-2.9Zn-2.9Mg-1.6Cu	87.4	87.7	6.6	7.0	2.5	2.4	3.6	3.2	0.07	0.02

Perhitungan banyaknya elemen yang hilang selama proses (wt. % of *element loss*) lebih jelasnya diuraikan pada Persamaan 4.1.

$$element\ loss\ (wt.\ \%) = \frac{initial\ composition - ICP\ composition}{initial\ composition} \quad (4.1)$$

#### a. Analisis Persen Berat (wt. %) Elemen Cu yang Hilang

Pada awalnya pengecoran dilakukan terhadap 12 paduan Al-Zn-Mg-Cu, kemudian setelah diperoleh hasil pengujian komposisi kimia (ICP) dilakukan analisis terhadap persen berat elemen yang hilang untuk pengecoran berikutnya. Kedua belas paduan awal tersebut ditunjukkan dengan baris yang tidak berwarna pada Tabel 4.1 dan Tabel 4.2.

Pada keterangan Tabel 4.1 terlihat bahwa paduan nomor 3, 9 dan 20 mengalami kegagalan (*rejected*) karena ditemukan *undissolved* tembaga secara visual setelah pengecoran. Tembaga yang ditemukan masih dalam bentuk *ingot* ini belum sempat berdifusi sempurna ke dalam paduan Al-Zn-Mg-Cu (lihat Gambar 4.1). Hal ini disebabkan penuangan yang terlalu dini dan terlalu singkatnya waktu tahan (*holding time*) pada proses pengecoran. *Holding time* merupakan waktu yang dibutuhkan *ingot* pada temperatur tertentu agar dapat melakukan pemaduan (*ingot* aluminium, seng, magnesium) dan difusi (*ingot* tembaga) secara sempurna membentuk paduan. Dengan demikian sejumlah elemen Cu yang hilang di beberapa paduan pada pengecoran 12 paduan awal disebabkan oleh waktu tahan yang terlalu singkat. Paduan yang mengalami *undissolved* tembaga di-*reject* dan tidak digunakan kembali, maka selanjutnya dilakukan pengecoran ulang terhadap komposisi ini. Pada sistem pengkodean paduan yang diulang pada pengecoran kedua diberi tanda /2 diakhir nomor paduan.



**Gambar 4.1.** *Undissolved* tembaga yang terjadi karena *holding time* yang terlalu singkat pada proses pengecoran.

Tabel 4.2 menunjukkan bahwa paduan dengan kadar Cu yang rendah (0.9 dan 1.6 wt. %) memiliki hasil pengujian komposisi yang sesuai dengan nilai nominal perhitungan awal yang diharapkan. Persentase Cu yang hilang (*Cu loss*) meningkat dengan bertambahnya kadar tembaga yang ada dalam paduan. Hal ini dikarenakan peningkatan kadar Cu dalam paduan tidak diikuti dengan peningkatan waktu tahan proses peleburan. Temperatur *holding* ditentukan berdasarkan analisis terhadap persen Zn yang hilang. Dari Tabel 4.2 terlihat bahwa *Zn loss* akan meningkat dengan kenaikan temperatur *holding* proses. Temperatur *holding* yang aman untuk peleburan Zn dan baik untuk proses difusi Cu pada penelitian ini berkisar antara 715-725 °C. Berdasarkan analisis terhadap hasil pengujian komposisi kedua belas paduan awal didapatkan kesimpulan bahwa waktu tahan selama 7 menit cukup untuk proses difusi 0.4, 0.7 dan 1.0 at. % Cu, namun untuk kadar Cu yang lebih tinggi (1.3 dan 1.6 at. % Cu) dibutuhkan waktu yang lebih lama, yaitu sekitar 8-9 menit.

Dalam aplikasi 10 paduan berikutnya, pengecoran dilakukan pada temperatur *holding* 715 °C (kecuali untuk paduan Al-1.7Zn-1.7Mg-1.0Cu (at. %) dilakukan pada temperatur 720 °C) untuk meminimalkan persentase Zn yang hilang. Selain itu, untuk memastikan Cu yang ada dapat berdifusi dengan sempurna waktu tahan dibuat menjadi 7-8 menit untuk kadar Cu 0.4, 0.7 dan 1.0 at. %, dan 9-10 menit untuk kadar Cu 1.3 dan 1.6 wt. %. Penambahan waktu  $\pm 1$  menit ini ternyata masih tidak cukup untuk memberi kesempatan Cu berdifusi dengan sempurna dalam paduan. Hal ini dibuktikan dengan ditemukannya kembali *undissolved* Cu pada paduan ke-20 (Al-2.9Zn-2.9Mg-1.6Cu (at. %)).

Dengan demikian dari data percobaan pada *batch* pertama dan kedua (yang ditandai dengan warna kuning pada Tabel 4.1 dan Tabel 4.2), hal-hal yang perlu diperhatikan untuk menghindari *Cu loss* adalah:

- temperatur *holding* proses 720-725 °C cukup untuk difusi pelat tipis logam Cu (ketebalan maksimum 0.7 mm) dan aman untuk meminimalkan *Zn loss*.

- waktu tahan 8 menit pada temperatur 720-725 °C cocok untuk paduan dengan kadar Cu terendah (0.4 dan 0.7 at. % Cu), 9-10 menit untuk paduan dengan kadar Cu 1.0 at. % dan 11 menit untuk kadar Cu tertinggi (1.3 dan 1.6 at. %).

#### **b. Analisis Persen Berat (wt. %) Elemen Mg yang Hilang**

Pengecoran awal (*batch* 1) dilakukan terhadap 12 paduan Al-Zn-Mg-Cu memberikan hasil komposisi kimia (ICP) yang baik untuk kadar Mg. Mg *loss* yang terjadi tidak terlalu signifikan. Berdasarkan data toleransi komposisi beberapa paduan aluminium seri 7xxx yang komersil di pasaran (lihat Tabel 2.5), 12 paduan awal memiliki nilai komposisi pada *range* yang diterima (*acceptable*). Mg *loss* yang terjadi berkisar antara 0 (tidak ada Mg yang hilang) sampai maksimum 2 wt. %, bahkan untuk paduan yang mengalami defisiensi (karena *undissolved*) Cu sekalipun. Namun demikian, kompensasi massa sebanyak 5 % dari massa pada perhitungan awal dilakukan pada pengecoran berikutnya. Hal ini dilakukan untuk meminimalkan Mg *loss* yang hilang pada pengecoran berikutnya.

Penambahan sebanyak 5 % didasarkan pada data banyaknya Mg yang hilang pada pengecoran paduan Al-1.7Zn-1.7Mg-0.4Cu dan Al-1.7Zn-1.7Mg-0.7Cu. Hasil pengujian komposisi kimia paduan nomor 1 dan 2 ini sangat baik atau jika dibandingkan dengan data komposisi paduan aluminium seri 7xxx pada Tabel 2.5, maka nilainya berada pada kisaran yang diterima (*acceptable*) untuk semua elemen. Penambahan massa untuk kompensasi elemen Mg yang hilang dilakukan mengikuti Persamaan 4.2. Dimana massa awal Mg sama dengan perhitungan neraca massa seperti ditunjukkan pada Tabel 3.2.

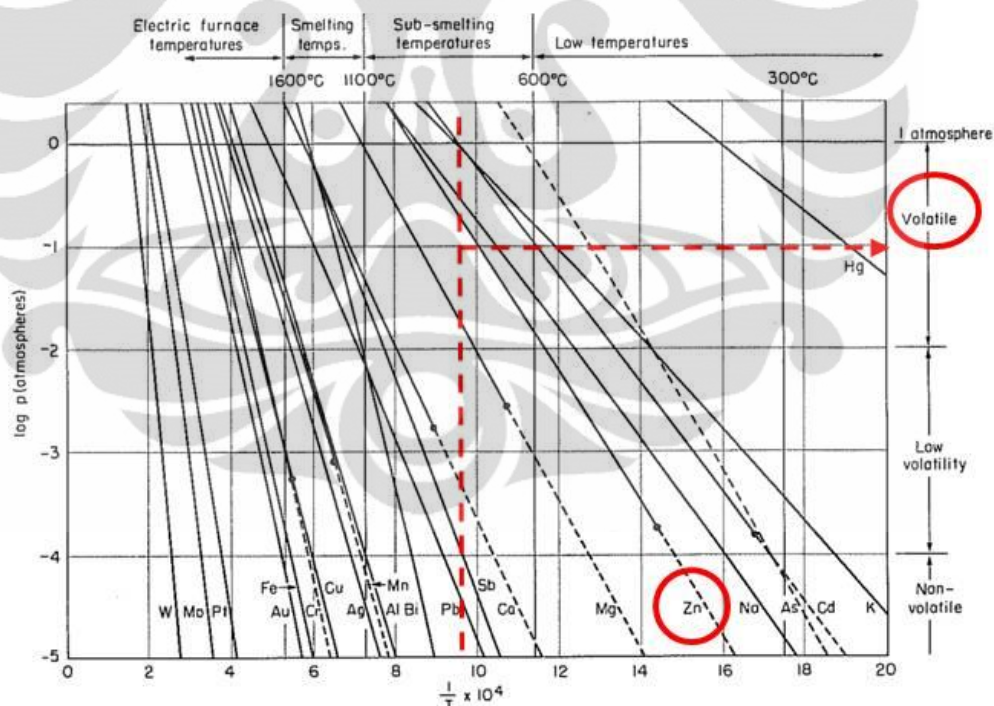
$$Mg \text{ addition (gram)} = 5\% \times \text{massa awal Mg} \quad (4.2)$$

#### **c. Analisis Persen Berat (wt. %) Elemen Zn yang Hilang**

Beberapa paduan aluminium seri 7xxx yang komersil di pasaran memiliki batasan nilai nominal dan batasan (*limitation*) komposisi elemen penyusunnya seperti ditunjukkan pada Tabel 2.5. Data pada Tabel 2.5 tersebut memberikan gambaran batasan deviasi atau penyimpangan maksimum dari elemen Zn adalah 0.5 % dapat kurang dari atau melebihi komposisi nominal yang

diinginkan. Sebagai contoh diambil salah satu referensi paduan aluminium 7029 yang memiliki komposisi nominal Zn = 4.7 wt. %, namun batasan komposisi yang dapat diterima berkisar antara 4.2-5.2 %.

Dengan memperhatikan kedua belas paduan awal ini (lihat Tabel 4.1) terlihat bahwakadar Zn yang hilang meningkat seiring dengan kenaikan temperatur dan waktu tahan proses pengecoran. Temperatur yang mempengaruhi meliputi temperatur maksimum, *holding*, dan tuang pada proses pengecoran. Hal ini berkaitan erat dengan titik leleh logam Zn yang rendah jika dibandingkan dengan elemen penyusun paduan lainnya, yaitu sekitar 419.5 °C dan titik uapnya pada 907 °C<sup>[12]</sup>. Semakin tinggi temperatur proses, maka akan semakin mendekati titik uap Zn yang akan meningkatkan kadar Zn yang hilang. Selain itu, dengan memperhatikan grafik tekanan uap pada beberapa logam (lihat Gambar 4.2), diprediksikan logam Zn berada dalam kondisi *volatile* pada proses pengecoran yang dilakukan.



**Gambar 4.2.** Tekanan uap untuk beberapa logam (garis *solid* menunjukkan data untuk logam cair dan garis putus-putus untuk logam padat)<sup>[12]</sup>.

Pengecoran paduan pada *batch* pertama memberikan gambaran mengenai persentase Zn yang hilang selama proses. Sehingga pada pengecoran berikutnya, dilakukan penambahan massa Zn untuk kompensasi Zn *loss*. Penambahan massa ini, disesuaikan dengan banyaknya Zn yang hilang karena

proses pengecoran yang lebih lama (berhubungan dengan waktu tahan untuk difusi Cu). Proses pengecoran yang dilakukan pada *batch* 2 didesain dengan skenario sebagai berikut:

- penambahan 9-10 % dari massa Zn pada perhitungan awal untuk paduan dengan kadar Cu rendah (0.4, 0.7 dan 1.0 at. %),
- penambahan Zn sebanyak 15 % dari massa pada perhitungan awal untuk paduan dengan kadar Cu tinggi (1.3 dan 1.6 at. %).

Hasil pengecoran paduan Al-Zn-Mg-Cu *batch* kedua menunjukkan adanya peningkatan kadar Zn pada pengujian komposisi kimia. Peningkatan ini disebabkan skenario kompensasi penambahan massa Zn yang terlalu tinggi. Namun demikian jika dibandingkan dengan data komposisi paduan aluminium seri 7xxx pada Tabel 2.5, maka nilainya berada pada *range* yang diterima (*acceptable*). Skenario kompensasi penambahan massa Zn yang sesuai untuk pengecoran Al-Zn-Mg-Cu dengan menggunakan Indutherm Vacuum Tilting Casting Machine VTC200 dari *ingot* elemennya ditunjukkan pada Persamaan 4.3. Penambahan massa sebagai kompensasi Zn *loss* sebanyak 5 % dilakukan untuk paduan Al-Zn-Mg-Cu dengan kadar Cu rendah (di bawah 1.0 at. %). Sedangkan penambahan 7-8 % dari massa awal digunakan untuk paduan dengan kadar Cu tinggi (lebih dari 1.6 at. %). Dimana massa awal Zn sama dengan perhitungan neraca massa seperti ditunjukkan pada Tabel 3.2.

$$Zn \text{ addition (gram)} = 5 \% \text{ (or } 7 - 8 \% \text{)} \times \text{massa awal Zn} \quad (4.3)$$

Kontrol terhadap Zn *loss* juga dilakukan dengan pengaturan parameter proses sebagai berikut:

- menjaga pengaturan daya generator (daya awal 6 kW, kemudian diturunkan menjadi 4.5 kW setelah mencapai temperatur  $\pm 430$  °C) untuk mencegah lompatan kenaikan temperatur yang terlalu tinggi,
- mengatur temperatur tuang berada diantara 725-730 °C untuk meningkatkan fluiditas logam cair namun tetap menjaga Zn agar tetap aman (tidak menguap).



#### d. Analisis Proses Pengecoran Paduan Al-Zn-Mg-Cu yang Sesuai

Proses pengecoran paduan aluminium 7075 oleh Shwe Wut H. A. *et al.*<sup>[73]</sup> dilakukan secara bertahap. Pada awalnya *ingot* aluminium dilebur sampai kondisi cair. Kemudian sejumlah seng yang disyaratkan (5.6 wt. %) ditambahkan ke dalam lelehan. Sedikit pengadukan dilakukan pada *green sand mold*. Selanjutnya logam paduan biner ini dituang. Penambahan magnesium ke dalam paduan biner Al-Zn meningkatkan respon terhadap pengerasan *ageing* yang lebih tinggi dibandingkan dengan penambahan seng ke paduan biner Al-Mg. Sehingga pada proses selanjutnya magnesium ditambahkan ke dalam paduan aluminium seng yang dilelehkan kembali dengan *crucible* grafit. Pelelehan kembali paduan Al-Zn dilakukan menggunakan *flux* yang mengandung sejumlah seng *chloride* dan aluminium *chloride* dengan perbandingan yang sama. Penambahan magnesium (yang sebelumnya dibungkus dengan menggunakan *scrap* aluminium) ke dalam paduan biner Al-Zn dilakukan sesaat sebelum penuangan. Sedikit pengadukan juga dilakukan untuk menghindari terbakarnya magnesium pada permukaan lelehan.

Pengecoran bertahap ini menghasilkan paduan biner yang memiliki titik lebur yang lebih rendah dari *pure ingot*-nya. Hal ini dapat mengeliminasi permasalahan difusi Cu dan peleburan Zn yang saling bertolak belakang. Difusi Cu memerlukan temperatur proses yang tinggi dan waktu tahan yang lama, sementara hal ini dapat mengakibatkan *Zn loss* yang bertambah besar. Dengan demikian *master alloy* menjadi pilihan terbaik untuk pengecoran paduan Al-Zn-Mg-Cu. *Master alloy* Al-Cu dan Al-Zn dapat digunakan untuk mengatasi permasalahan proses pengecoran Al-Zn-Mg-Cu.

#### 4.1.2 Analisis Cacat Pengecoran

##### a. Penyusutan Volume karena Pembekuan

Kedalaman cacat *shrinkage* (penyusutan) berkisar diantara 12-18 mm, atau sekitar  $\frac{1}{4}$  dari total panjang *billet*. Bagian ini akan dibuang dan menjadi *scrap* produk (lihat Gambar 4.3). Penyusutan volume merupakan cacat yang pasti terjadi pada pengecoran karena adanya pembekuan dari fasa *liquid* ke *solid*. Penyusutan *liquid* bukan merupakan permasalahan pengecoran, selama tersedia logam yang

cukup untuk mengisi *shrinkage cavity*<sup>[47]</sup>. Dimana, nilai kedalaman penyusutan *billet* paduan Al-Zn-Mg-Cu juga berada dalam nilai yang normal terjadi pada pengecoran paduan aluminium dengan Indutherm Vacuum Tilting Casting Machine VTC200.

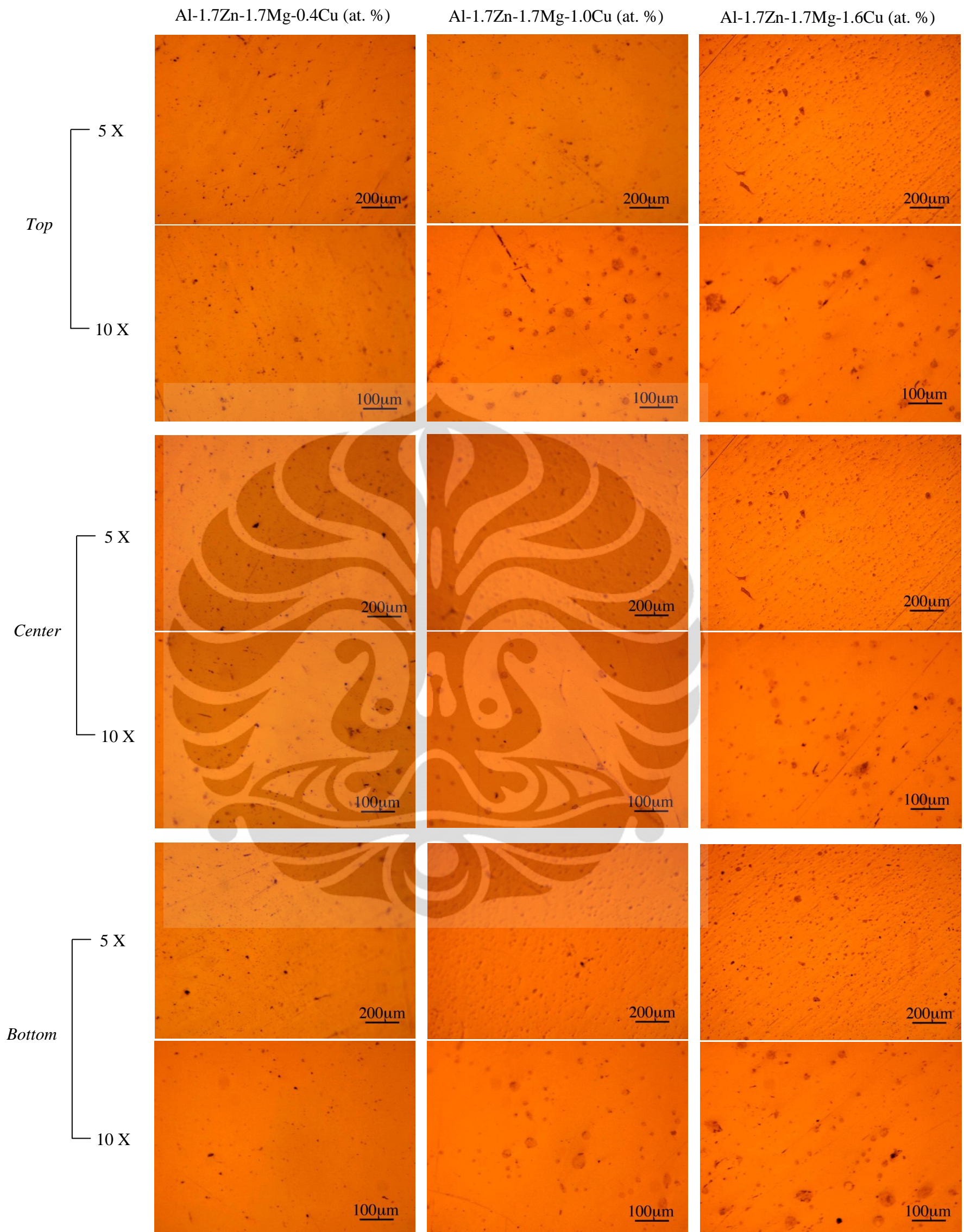


**Gambar 4.3.** Bagian *shrinkage* akan dipotong dan menjadi *scrap* produk.

#### **b. Porositas Gas**

Pengecoran dilakukan dengan menggunakan mesin induksi pada keadaan vakum. Tekanan yang digunakan adalah 0.001 atm. Pada keadaan ini diharapkan gas-gas yang ada di lingkungan proses dapat diminimalkan. Nitrogen, oksigen, dan hidrogen adalah gas yang paling banyak menjadi penyebab pada kasus porositas gas<sup>[49]</sup>. Pada pengecoran logam aluminium, hidrogen adalah satu-satunya gas yang dapat terlarut dalam skala besar, yang dapat menyebabkan porositas gas hidrogen. Porositas gas dapat terbentuk pada permukaan produk pengecoran atau terperangkap di dalam logam produk cor. Melalui pengamatan mikroskop optik pada *billet as cast*, tidak ditemukan adanya cacat porositas. Pengamatan kualitas produk cor (terkait dengan pengecekan cacat porositas) dilakukan pada tiga bagian *billet* yaitu bagian atas (*top*) dekat bagian *shrinkage*, tengah (*middle*) dan dasar (*bottom*). seperti ditunjukkan pada Gambar 3.32 (b). *Billet* yang diamati yaitu paduan Al-1.7Zn-1.7Mg-0.4Cu, Al-1.7Zn-1.7Mg-1.0Cu dan Al-1.7Zn-1.7Mg-1.6Cu (at. %) pada perbesaran 5X dan 10X tanpa etsa seperti ditunjukkan pada Gambar 4.4.





**Gambar 4.4.** 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. %) pada perbesaran 5X dan 10X tanpa etsa.

Pengamatan pada mikroskop optik 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). Melalui Persamaan 2.1 mengenai reaksi pembentukan hidrogen pada aluminium, kita mendapat gambaran bahwa *hydrogen porosity* akan menurun seiring dengan peningkatan kadar paduan. Sehingga melalui pengamatan mikroskop optik, dapat disimpulkan bahwa bintik coklat kehitaman bukanlah porositas gas, karena jumlahnya meningkat dengan penambahan kadar Cu dalam paduan. Selain itu peningkatan konsentrasi bintik coklat kehitaman seiring dengan peningkatan kadar Cu dalam paduan mengindikasikan hal ini berhubungan dengan peningkatan presipitat yang terbentuk karena elemen Cu. Pada pengamatan lebih lanjut dengan SEM yang akan diuraikan pada pembahasan berikutnya, menunjukkan bahwa mereka adalah presipitat. Dengan demikian terbukti bahwa lingkungan vakum sangat baik bagi peleburan paduan Al-Zn-Mg-Cu untuk meminimalisir adanya gas hidrogen yang dapat menyebabkan porositas pada produk cor.

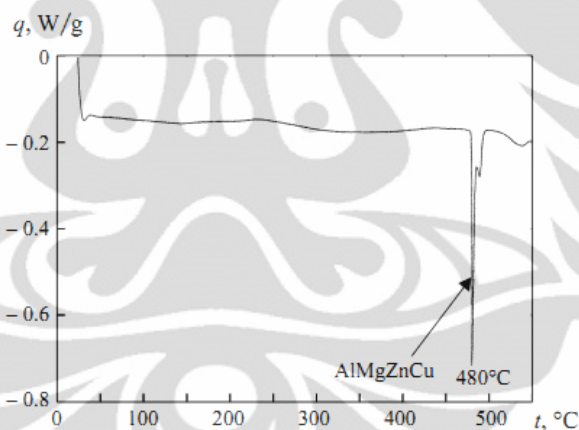
#### 4.2 Analisis Proses Homogenisasi

Proses homogenisasi paduan Al-Zn-Mg-Cu dalam penelitian ini dilakukan pada temperatur 500 °C selama 24 jam dengan menggunakan *muffle furnace*. Proses homogenisasi dilakukan untuk penyeragaman butir dan fasa pada produk cor. Menurut hasil studi literatur homogenisasi pada produk cor dapat menghilangkan segregasi, dan meningkatkan *formability*<sup>[3]</sup>. Selain itu, melalui homogenisasi sejumlah *iron*, mangan dan logam lainnya dapat larut diatas batas kelarutannya sehingga melalui perlakuan ini nantinya dapat dihasilkan tidak hanya proses pelarutan namun juga presipitasi<sup>[39]</sup>. Besi (Fe) merupakan pengotor yang paling umum ditemukan pada aluminium<sup>[33]</sup>. Fe dapat membentuk fasa intermetalik seperti Al<sub>7</sub>Cu<sub>2</sub>Fe yang memiliki nilai kekerasan yang tinggi. Kekerasan yang lebih tinggi pada area tertentu dapat mempengaruhi *formability*, dimana dapat terjadi *crack* pada proses pengerolan yang akan dilakukan pada tahapan berikutnya. Dengan demikian diharapkan Fe dapat larut dengan sempurna melalui homogenisasi agar diperoleh kekerasan yang seragam. Setelah



homogenisasi, *billet* dicelup di dalam air agar strukturnya tidak kembali ke bentuk sebelumnya.

Homogenisasi suatu paduan harus dilakukan di bawah temperatur leburnya. Temperatur yang terlalu tinggi tidak hanya akan memberikan kesempatan bagi atom-atom paduan untuk berdifusi dengan merata, namun juga dapat meleburnya. Peleburan kembali ini sangat tidak diharapkan karena dapat merubah bentuk dan mempengaruhi pemaduan elemen, sehingga tujuan homogenisasi tidak tercapai. Penelitian yang dilakukan Nayan, *et al.*<sup>[74]</sup> menyebutkan bahwa parameter yang penting pada proses homogenisasi adalah temperatur dan waktu *annealing*. Penentuan temperatur proses yang sesuai untuk proses homogenisasi suatu paduan umumnya dianalisis dari kurva *differential scanning calorimetry* (DSC). Kurva ini penting untuk mengetahui daerah temperatur lebur suatu paduan. Kurva DSC untuk spesimen pengecoran paduan AA7075 ditunjukkan pada Gambar 4.5.



**Gambar 4.5.** Kurva DSC paduan *cast* AA7075 (diuji pada spesimen dengan diameter 500 mm)<sup>[74]</sup>.

Gambar 4.5 menunjukkan temperatur lebur dari eutektik paduan AA7075 berada pada *range* 480-487 °C. Kurva DSC spesifik untuk setiap paduan, dimana pada paduan AA7075 komponen utama penentu durasi dari siklus difusi pada proses homogenisasi adalah tembaga<sup>[74]</sup>. Selain itu mode *annealing* homogenisasi juga tergantung pada ukuran butir dari struktur *as cast*, karena ukuran ini penting untuk menentukan *path* difusi dari komponen paduan dan *impurities*<sup>[74]</sup>. Pada penelitiannya Nayan, *et al.*<sup>[74]</sup> juga menyimpulkan untuk butir yang kasar (175-

200  $\mu\text{m}$ ) dari paduan AA7075 lebih baik dilakukan dua tahap homogenisasi (470  $^{\circ}\text{C}$ , 18 jam + 490  $^{\circ}\text{C}$ , 7 jam) karena dapat mengurangi durasi perlakuan panas.

Berdasarkan penjelasan tersebut, penentuan temperatur proses homogenisasi yang dilakukan pada penelitian ini dapat dikatakan masih belum memenuhi prosedur penelitian, karena tidak dilakukan analisis DSC sebelumnya. Analisis DSC paling tidak diperlukan pada beberapa sampel untuk memberikan gambaran mengenai daerah temperatur lebur eutektik paduan. Namun demikian temperatur homogenisasi paduan Al-Zn-Mg-Cu pada 500  $^{\circ}\text{C}$  dalam penelitian ini diharapkan masih belum mengakibatkan peleburan internal pada *billet*. Hal ini dikarenakan Mondolfo menyebutkan bahwa untuk paduan Al-Zn-Mg dengan kekuatan rendah sampai sedang temperatur homogenisasi 577-617  $^{\circ}\text{C}$  masih aman digunakan.

### 4.3 Analisis Proses Pengerolan Panas

Proses pengerolan paduan Al-Zn-Mg-Cu pada penelitian ini bertujuan untuk mereduksi ketebalan sehingga didapatkan pelat dengan tebal 1.7-2 mm. Melalui proses pengerolan juga didapatkan peningkatan sifat mekanis material karena deformasi plastis. Ketebalan material dijaga agar tidak terlalu tipis. Hal ini dikarenakan pada proses pengujian kekerasan paling tidak dibutuhkan ketebalan spesimen paling sedikit satu sampai satu setengah kali besarnya diagonal indentasi<sup>[70]</sup>.

Pada proses pembentukan panas, karena ada bantuan temperatur, logam dapat dideformasi lebih besar, dan tegangan yang diperlukan relatif lebih rendah dibandingkan pada proses pembentukan dingin. Namun demikian, pada proses ini mudah terbentuk lapisan oksida (kerak) di permukaan logam (lihat Gambar 2.18). Lapisan oksida di permukaan *billet* dapat dilihat pada Gambar 4.6, dimana spesimen ini tidak digunakan karena mengalami keretakan pada proses pengerolan.



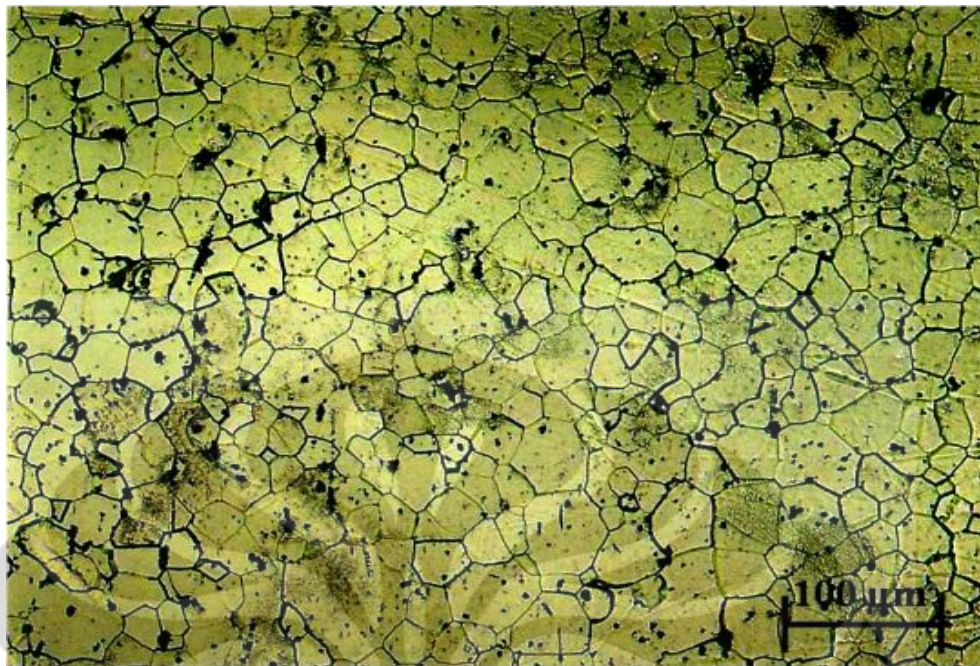


**Gambar 4.6.** Oksida pada permukaan *billet* yang terbentuk karena pengerolan panas.

#### 4.3.1 Analisis Pengaruh Temperatur Proses

Proses pengerolan paduan Al-Zn-Mg-Cu dilakukan dengan alat rol manual dengan menggunakan kekuatan tangan sebagai gaya pendorong putaran tuas. Akibatnya besar deformasi yang diberikan tidak dapat seragam pada setiap laluan. Parameter alat rol yang dapat diatur adalah celah atau *gap roll mill* (lihat Gambar 3.38 (a) dan (b)). Satu putaran penuh tuas pengatur ketinggian *roll mill* bagian atas sama dengan 1.5 mm perubahan celah rol. Namun demikian tetap sulit untuk mendapatkan nilai atau perhitungan pasti mengenai jumlah defomasi yang dilakukan pada setiap laluan. Sehingga proses pengerolan dilakukan dengan jumlah laluan yang berbeda tergantung pada keadaan sampel hingga didapatkan pelat dengan ketebalan minimum 1.7 mm.

Parameter pengerolan lain yang perlu diperhatikan adalah temperatur *preheating billet*. Pemilihan temperatur proses 290-430 °C didasarkan pada percobaan terhadap studi literatur dari penelitian yang telah dilakukan E. Di Russo *et. al.*<sup>[57]</sup> pada pelat aluminium 7075 dengan tebal 10 mm. Parameter temperatur penelitian yang telah dilakukannya digunakan dan disesuaikan pada pengerolan paduan Al-Zn-Mg-Cu dalam penelitian ini. Dalam penelitiannya *range* temperatur 290-430 °C dikategorikan ke dalam pengerolan panas dan hangat (*warm rolling*). Sehingga diharapkan proses pengerolan panas pada penelitian ini tidak dilakukan pada *range* temperatur yang terlalu tinggi yang dapat mempengaruhi pemaduan elemen. Struktur butir *as rolled* diamati pada paduan Al-2.9Zn-2.9Mg-0.7Cu (at. %) dengan menggunakan mikroskop optik seperti ditunjukkan pada Gambar 4.7. Zat etsa yang digunakan adalah Keller's *reagent*<sup>[71]</sup>.



**Gambar 4.7.** Struktur mikro *as rolled* paduan Al-2.9Zn-2.9Mg-0.7Cu (at. %) pada perbesaran 100x dengan menggunakan zat etsa Keller's reagent.

Struktur butir yang ditunjukkan pada Gambar 4.7 memperlihatkan bentuk dan ukuran yang tidak seragam dan sangat bervariasi. Adanya butir yang berukuran kecil ( $\pm 5 \mu\text{m}$ ) sampai butir kasar yang hampir berukuran  $100 \mu\text{m}$  disebabkan temperatur proses yang sulit dijaga konstan. *Roll mill* dipanaskan dengan menggunakan *heat gun*. Temperatur pemanasan *roll mill* yang dapat dicapai adalah  $70\text{-}80 \text{ }^\circ\text{C}$ . Temperatur *billet* yang lebih tinggi dapat dengan mudah diserap oleh *roll mill* secara konduksi. Sehingga proses pengerolan panas pada setiap laluan sulit untuk dijaga pada kisaran temperatur yang konstan. Akibatnya proses rekristalisasi dinamik yang terjadi pada pengerolan panas (seperti ditunjukkan pada Gambar 2.19) tidak dapat berlangsung dengan seragam. Hal ini tidak menjadi permasalahan bagi proses perlakuan panas yang akan dilakukan selanjutnya, karena melalui *solution treatment* akan terjadi pelarutan atom dan perubahan struktur butir membentuk larutan padat lewat jenuh (SSSS).

### 4.3.2 Analisis Cacat Pengerolan

Proses pengerolan manual yang dilakukan dapat menjadi salah satu penyebab adanya beberapa cacat pada pelat. Cacat ini meliputi *alligating*, *wavy edge*, *overlap* dan *fish tail*, *wrinkling* sampai dengan *crack* yang menyebabkan pelat tidak dapat digunakan untuk proses selanjutnya. Kesulitan dalam menjaga parameter proses, seperti pengkondisian temperatur dan besarnya deformasi yang dilakukan merupakan dampak negatif pengerolan yang dilakukan secara manual. Namun demikian, hal ini tidak mempengaruhi proses selanjutnya, karena pelat yang cacat tidak akan digunakan untuk proses selanjutnya. Cacat yang terjadi hanya akan menyebabkan banyaknya material yang akan terbuang karena tidak dapat digunakan untuk proses perlakuan panas.

Selain pengaruh parameter alat yang sulit untuk dijaga konstan, berdasarkan penelitian padapengerolan kedua puluh komposisi paduan, terdapat pengaruh kadar elemen terhadap cacat pelat. Pengaruh temperatur dan komposisi paduan dapat dilihat pada Tabel 4.3 (baris dengan warna kuning adalah *trial*). Data pada Tabel 4.3 menunjukkan bahwa semakin besar kadar Cu dalam paduan, semakin sulit untuk dilakukan pengerolan karena peningkatan kekerasan material. Berbagai cacat mulai terjadi pada pengerolan sampel dengan kadar Cu lebih dari 1.3 at. % atau sekitar 2.9 wt. %. Hal ini sesuai dengan data literatur yang menyebutkan bahwa kadar Cu maksimum dalam paduan aluminium seri 7xxx yang komersil dipasaran dibatasi sampai 3 wt. %<sup>[39,40]</sup>. Selain itu, data pada Tabel 4.3 juga menunjukkan bahwa, dengan peningkatan kadar Zn dalam paduan Al-Zn-Mg-Cu, maka kadar Cu maksimum Cu dalam paduan sebaiknya dikurangi, karena dapat meningkatkan cacat pengerolan.

Tabel 4.3. Rangkuman proses dan hasil pengerolan 20 paduan Al-Zn-Mg-Cu.

No.	Kode Paduan (at. %)	Rolling Parameter			Hasil			Analisis
		T <sub>rolling</sub> (°C)	Waktu Pemanasan Awal (jam)	Dimensi Awal	Ketebalan Akhir (mm)	Rata-rata % Reduksi	Penampakan Pelat	
9	Al-2.1Zn-2.1Mg-1.3Cu	500	1	half cast billet	-	-	Crack	- temperatur terlalu tinggi - deformasi awal terlalu besar
3	Al-1.7Zn-1.7Mg-1.0Cu	450	1	half cast billet	9.065	29	Good	- trial
20	Al-2.9Zn-2.9Mg-1.6Cu	420	24	1/4 cast billet	-	-	Crack	- trial untuk dissolve Cu
1	Al-1.7Zn-1.7Mg-0.4Cu	430	1	1/4 cast billet	1.75	75.5	Good	
2	Al-1.7Zn-1.7Mg-0.7Cu	430	1	1/4 cast billet	1.86	64.055	Good	
3/2	Al-1.7Zn-1.7Mg-1.0Cu	420	1	1/4 cast billet	1.95	70.15	Good	
4	Al-1.7Zn-1.7Mg-1.3Cu	310	1	1/4 cast billet	1.99	67.505	Good	
5	Al-1.7Zn-1.7Mg-1.6Cu	290	1	1/4 cast billet	1.855	70.34	Crack	- "alligatoring" -->kadar Zn & Cu tinggi
6	Al-2.1Zn-2.1Mg-0.4Cu	420	1	1/4 cast billet	1.82	68.48	Good	
7	Al-2.1Zn-2.1Mg-0.7Cu	420	1	1/4 cast billet	1.935	67.725	Good	
8	Al-2.1Zn-2.1Mg-1.0Cu	410	1	1/4 cast billet	1.825	71.17	Crack di sisi	- temperatur terlalu tinggi
9/2	Al-2.1Zn-2.1Mg-1.3Cu	290	1	1/4 cast billet	1.985	67.45	Crack	- karena komposisi material -->kadar Zn & Cu tinggi
10	Al-2.1Zn-2.1Mg-1.6Cu	300	1	1/4 cast billet	1.85	67.13	Crack di sisi	- masih dapat digunakan
11	Al-2.5Zn-2.5Mg-0.4Cu	410	1	1/4 cast billet	1.675	68.11	Good	
12	Al-2.5Zn-2.5Mg-0.7Cu	410	1	1/4 cast billet	1.92	61.52	Good	
13	Al-2.5Zn-2.5Mg-1.0Cu	390	1	1/4 cast billet	-	-	All Crack	- temperatur terlalu tinggi ( <i>reject</i> )
13	Al-2.5Zn-2.5Mg-1.3Cu	310	1	1/4 cast billet	1.795	64.975	Crack	- karena komposisi material -->kadar Zn & Cu tinggi
14	Al-2.5Zn-2.5Mg-1.6Cu	300	1	1/4 cast billet	1.94	67.31	Crack di sisi	- masih dapat digunakan
15	Al-2.5Zn-2.5Mg-0.4Cu	300	1	1/4 cast billet	1.92	65.725	Crack	- mengumpulkan bagian retak yang masih dapat digunakan
16	Al-2.9Zn-2.9Mg-0.4Cu	310	1	1/4 cast billet	1.9	63.89	Good	
17	Al-2.9Zn-2.9Mg-0.7Cu	310	1	1/4 cast billet	1.8	66.78	Good	
18	Al-2.9Zn-2.9Mg-1.0Cu	310	1	1/4 cast billet	1.765	70.715	Crack	- karena komposisi material -->kadar Zn & Cu tinggi
19	Al-2.9Zn-2.9Mg-1.3Cu	300	1	1/4 cast billet	1.94	73.31	Crack	- 2 billet terbagi menjadi 5 pelat karena crack
20/2	Al-2.9Zn-2.9Mg-1.6Cu	300	1	1/4 cast billet	1.88	71.96	Crack	- mengumpulkan bagian retak yang masih dapat digunakan



Rangkuman proses dan hasil pengerolan 20 paduan Al-Zn-Mg-Cu pada Tabel 4.3 dapat memberikan informasi antara lain sebagai berikut:

- 1) Dimensi awal setengah dari ketebalan *billet* sulit untuk dilakukan pengerolan manual pada penelitian ini (melihat hasil *trial*). Ketebalan awal yang besar akan memakan waktu dan tenaga yang lebih besar jika dilakukan dengan manual.
- 2) Kisaran temperatur proses pengerolan 290-430 °C disesuaikan dengan komposisi paduan:
  - a. Temperatur 410-430 °C aman digunakan untuk pengerolan paduan dengan kadar Zn dan Mg di bawah 2.1 at. % dan kadar Cu di bawah 0.7 at. %.
  - b. Kadar Zn dan Mg yang lebih tinggi (2.5 dan 2.9 at. %,) jika diikuti dengan peningkatan kadar Cu ( $\geq 1$  at. %) membutuhkan temperatur proses pengerolan yang lebih rendah yaitu 290-310 °C.
  - c. Pengerolan pelat dengan kadar Zn dan Mg yang cukup tinggi (2.5 at. %) jika tidak disertai dengan peningkatan kadar Cu (masih di bawah 0.7 at. %) aman dilakukan dilakukan pada *range* temperatur 410-430 °C.
- 3) Peningkatan kadar Zn dan Mg (sampai dengan 2.9 at. %) sebaiknya tidak diikuti dengan peningkatan kadar Cu yang melebihi 0.7 at. %, karena menyebabkan material menjadi getas dan sulit dilakukan pengerolan.
- 4) Paduan dengan kadar Zn dan Cu yang tinggi, yaitu Al-2.5Zn-2.5Mg-1.6Cu, Al-2.9Zn-2.9Mg-1.3Cu dan Al-2.9Zn-2.9Mg-1.6Cu (at. %) sangat sulit direduksi menjadi pelat. Akibatnya, sampel *heat treatment* diperoleh dengan mengumpulkan bagian pecahan pelat (karena retak) yang masih dapat digunakan. Retak terjadi menyeluruh pada bagian sisi dan ujung pelat. Bagian ujung pelat umumnya mengalami *alligatoring*. *Trial* yang digunakan untuk melarutkan Cu dalam paduan Al-2.9Zn-2.9Mg-1.6Cu (at. %) (dengan *preheating billet* selama 24 jam pada temperatur 420 °C) tidak dapat memecahkan permasalahan kegetasan material dengan kadar Zn dan Cu yang tinggi.

- 5) Rata-rata ketebalan akhir adalah 1.86775 mm dengan rata-rata reduksi 68.19 %.

#### a. *Alligatoring*

*Alligatoring* merupakan cacat pengecoran dimana pelat logam terbelah menjadi dua secara vertikal seperti bukaan mulut buaya. Cacat ini disebabkan oleh deformasi yang tidak seragam selama proses<sup>[47]</sup> pengerolan dan dapat juga dipengaruhi oleh aspek metalurgi seperti inklusi non-logam<sup>[58]</sup>. Pada penelitian ini cacat *alligatoring* yang terjadi (lihat Gambar 4.8) dapat dipengaruhi oleh tidak seragamnya proses deformasi selama proses dikarenakan pengerolan yang dilakukan secara manual. Selain itu kadar Cu yang tinggi (mencapai 3.6 wt. %) dapat meningkatkan kekerasan *billet* secara signifikan sehingga mengalami *alligatoring* pada bagian ujung pelat.



**Gambar 4.8.** Cacat pengerolan *alligatoring* yang terjadi pada paduan Al-1.7Zn-1.7Mg-1.6Cu (at. %). Selain disebabkan oleh deformasi yang tidak seragam, *alligatoring* pada penelitian ini juga diakibatkan oleh peningkatan kadar Cu dalam paduan (mencapai 1.6 at. %).

#### b. *Overlap dan fishtail*

*Overlap* dan *fishtail* (seperti ditunjukkan pada Gambar 2.21) adalah cacat yang tidak dapat dihindari pada proses pengerolan. *Overlap* terjadi karena tidak seragamnya deformasi pada ketebalan, sedangkan *fishtail* disebabkan oleh ketidakseragaman deformasi pada bagian lebar<sup>[58]</sup>. Ukuran cacat *overlap* dan *fishtail* yang terjadi berbeda-beda tergantung pada ketidakseragaman deformasi yang ada seperti ditunjukkan pada Gambar 4.9. Biasanya, semakin tebal *initial thickness* dari *billet* maka semakin besar ukuran cacat *overlap* dan *fish tail*-nya. Cacat ini akan dipotong dan tidak akan dilanjutkan ke proses perlakuan panas, karena dikhawatirkan bagian tersebut memiliki sifat yang berbeda dari paduan awalnya.





**Gambar 4.9.** Cacat pengerolan *overlap* dan *fishtail* pada pengerolan paduan Al-Zn-Mg-Cu. Untuk membedakan kedua cacat ini, korelasikan Gambar 4.9 dengan Gambar 2.21.

### c. *Wrinkling* dan *hairline crack*

Cacat ini ditemukan pada trial pengerolan yang dilakukan dengan ketebalan spesimen awal  $\frac{1}{2}$  bagian *billet*. Proses reduksi yang terlalu berlebihan pada *billet* tersebut menyebabkan cacat *wrinkle* atau pengerutan permukaan logam pada sisi lembaran bahkan setelah diputar  $90^\circ$  dari laluan terakhir dan jika tetap dilakukan deformasi akhirnya menimbulkan *hairline crack*. Cacat ini ditunjukkan pada Gambar 4.10.



**Gambar 4.10.** Cacat pengerolan *wrinkling* dan *hairline crack* pada pengerolan paduan Al-Zn-Mg-Cu. Cacat ini terjadi pada *trial* pengerolan yang dilakukan dari  $\frac{1}{2}$  ketebalan *billet*.

#### d. *Wavy edge*

Arah deformasi dalam setiap laluan diatur sedemikian rupa untuk mendapatkan hasil pengerolan yang sesuai. Cacat *wavy edge* terjadi karena *over-rolling* di bagian tertentu pada *strip* yang masuk. *Wavy edge* memberikan bentuk bergelombang dan tidak rata pada pelat sehingga nantinya akan sulit dilakukan penjejakan pengujian kekerasan. *Wavy edge* dengan jelas dapat dilihat pada sampel *trial* pengerolan dari  $\frac{1}{2}$  *billet*, dimana permukaan sampel menunjukkan yang baik namun jika dilihat dari samping bentuknya bergelombang seperti ditunjukkan pada Gambar 4.11 (a) dan (b). Sampel dengan cacat seperti ini umumnya diberikan pengerolan yang berbeda  $90^\circ$  dari arah sebelumnya untuk meratakan sampel. Namun jika bentuk gelombang terjadi pada sampel yang panjang, perlu dilakukan pemotongan terlebih dahulu, karena adanya bagian bergerigi (untuk pengerolan kawat) pada alat rol yang digunakan (lihat Gambar 3.38 (b)).

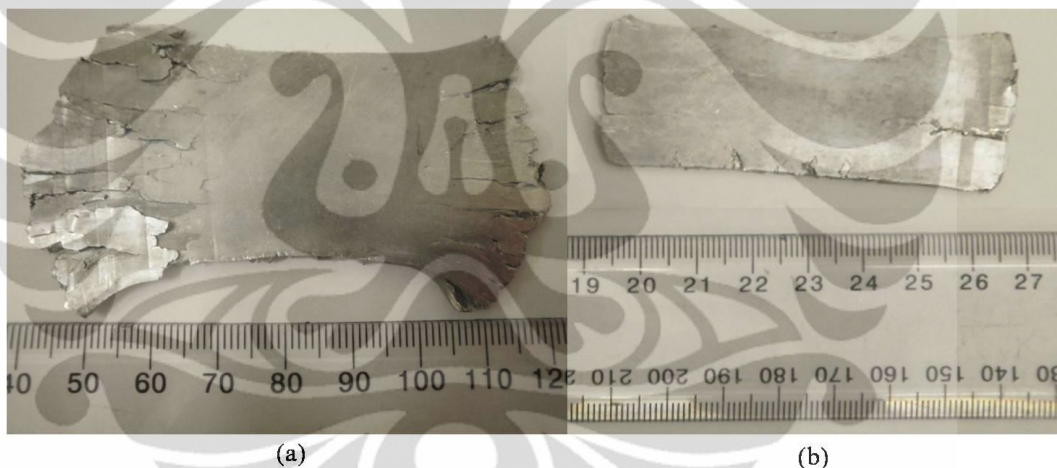


**Gambar 4.11.** Cacat *wavy edge* pada pengerolan paduan Al-Zn-Mg-Cu (a) Tampak depan. (b) Tampak samping. Cacat ini dapat dilihat dengan jelas pada sampel *trial* pengerolan dari  $\frac{1}{2}$  ketebalan *billet*.

#### d. *Crack* pada bagian sisi dan ujung pelat

Seperti telah dijelaskan paduan dengan kadar Zn dan Cu yang tinggi sangat sulit untuk direduksi menjadi pelat. Berbagai parameter proses seperti pengaturan celah rol dan temperatur *preheating billet* telah dilakukan untuk mengatasi permasalahan ini. Namun, sifat mekanik material yang lebih keras dan getas mengakibatkan *billet* dengan kandungan Zn dan Cu yang tinggi sulit untuk dideformasi. Bahkan pada saat pengerolan, tidak jarang terdengar suara *crack* yang muncul dari sampel.

Pelat untuk spesimen *heat treatment* dengan kandungan Zn dan Cu yang tinggi seperti paduan Al-2.5Zn-2.5Mg-1.6Cu, Al-2.9Zn-2.9Mg-1.3Cu dan Al-2.9Zn-2.9Mg-1.6Cu (at. %) dihasilkan dari pengumpulan bagian yang masih dapat digunakan. Selama pelat tidak mengalami *alligatoring*, pecahan pelat karena retak masih dapat dipotong dengan dimensi  $\pm 6 \times 20$  mm untuk digunakan sebagai sampel *heat treatment*. Pelat dengan *crack* di ujung umumnya diawali dengan mekanisme *alligatoring* seperti ditunjukkan pada Gambar 4.12 (a). Sehingga bagian yang *crack* ini dipotong dan tidak dapat digunakan sebagai sampel *heat treatment*. Pelat dengan *crack* di sisi seperti ditunjukkan pada Gambar 4.12 (b) umumnya masih dapat digunakan, dengan memotong bagian yang retak. Retak sisi juga umumnya memanjang dengan sendirinya pada saat proses pengerolan, sehingga pelat dapat terbagi menjadi beberapa bagian seperti ditunjukkan data nomor 19 pada Tabel 4.3 (paduan Al-2.9Zn-2.9Mg-1.3Cu (at. %)).



**Gambar 4.12.** (a) Retak pelat pada bagian ujung, yang pada umumnya di dalamnya terdapat cacat *alligatoring* sehingga keseluruhan bagian tidak dapat digunakan sebagai sampel *heat treatment*. (b) Retak pelat pada bagian samping, bagian yang retak dibuang, dan daerah sekitar *crack* yang permukaannya masih rata dapat digunakan untuk sampel *heat treatment*. Kedua jenis retak seperti ini ditemukan pada sampel dengan kadar Zn dan Cu yang tinggi.

## BAB 5

### ANALISIS PENGARUH Zn DAN Mg DALAM PADUAN Al-Zn-Mg-Cu SELAMA AGEING PADA TEMPERATUR = 120 °C

#### 5.1 Analisis Kurva Age Hardening

Proses *ageing* dilakukan setelah *solution treatment* (pada temperatur 470 °C dengan menggunakan *salt bath* selama 90 menit) dan *quenching* dalam air seperti dijelaskan pada sub pembahasan 3.8. Pada awalnya *ageing* dilakukan pada temperatur 120 °C dengan menggunakan *oil bath* terhadap kedua puluh paduan Al-Zn-Mg-Cu. Namun demikian kurva kekerasan *ageing* pada temperatur 120 °C tidak menunjukkan adanya fenomena *rapid hardening*. Sehingga dilakukan juga proses *ageing* pada temperatur 190 °C untuk mengungkap fenomena *rapid hardening*, dimana hasil dan pembahasannya akan diuraikan pada Bab 7 selanjutnya.

Pembahasan hasil proses *ageing* pada temperatur 120 °C meliputi pengaruh elemen Zn dan Mg yang akan diuraikan pada Bab 5 ini dan pengaruh Cu yang akan dipaparkan pada Bab 6. Efek perlakuan panas *artificial ageing* memberikan informasi mengenai evolusi mikrostruktur selama proses *ageing* yang dibuktikan melalui pengamatan dengan mikroskop optik, *scanning electron microscope* (SEM) dan *transmission electron microscope* (TEM). Analisis presipitat dalam paduan dilakukan dengan menggunakan bantuan *energy dispersive spectroscopy* (EDS). Analisis kuantitatif fasa dan ukuran butir juga dilakukan untuk membuktikan evolusi mikrostruktur yang terjadi selama *ageing* yang mempengaruhi sifat mekanis material. Sifat mekanis yang diamati adalah kekerasan paduan yang tergantung pada variabel temperatur dan waktu *ageing*.

Seng dan magnesium merupakan elemen paduan utama dimana rasio Zn:Mg yang tinggi dapat menghasilkan kekuatan yang baik karena efek respons pengerasan presipitasi yang lebih tinggi<sup>[39]</sup>. Pengaruh komposisi Zn dan Mg dalam paduan Al-Zn-Mg-Cu diamati pada variabel komposisi Cu yang tetap. Dimana dari kedua puluh paduan yang diamati, terdapat lima variabel Cu (0.4, 0.7, 1.0, 1.3 dan 1.6 at. %) yang divariasikan dengan empat variabel komposisi Zn dan Mg.

Gambar 5.1 (a), (b), (c), (d) dan (e) menunjukkan pengaruh Zn dan Mg dalam paduan Al-Zn-Mg-Cu dengan komposisi Cu berturut-turut 0.4, 0.7, 1.0, 1.3 dan 1.6 at. %. Secara umum kurva pada Gambar 5.1 ini menunjukkan bahwa nilai kekerasan pada setiap variabel waktu *ageing* meningkat cukup signifikan dengan penambahan Zn dan Mg. Hal ini ditunjukkan dengan peningkatan nilai kekerasan puncak yang cukup signifikan pada masing-masing paduan dengan komposisi Cu yang tetap.

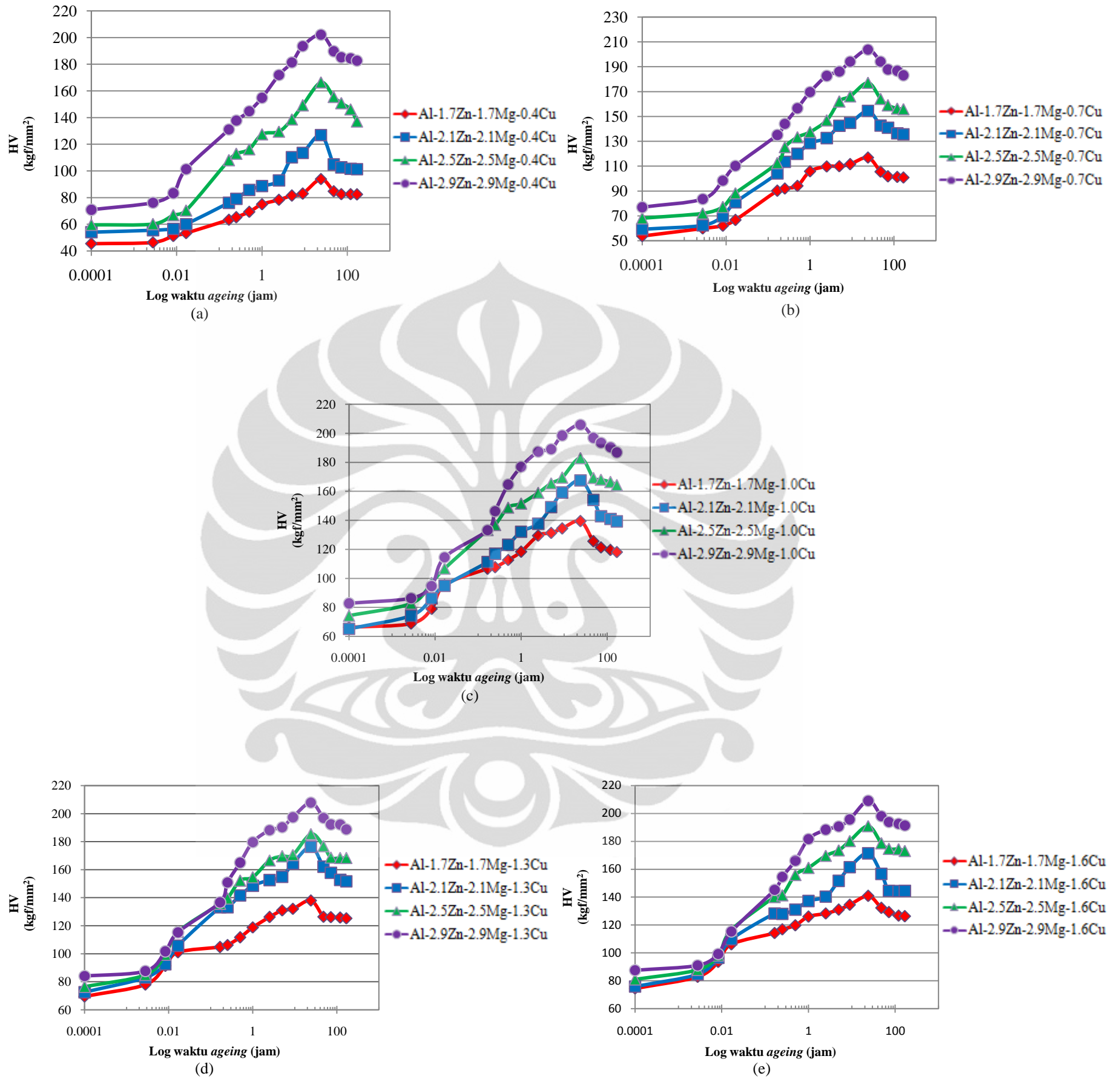
Variabel terendah Cu pada penelitian ini dilakukan pada komposisi 0.4 at. %. Dengan membandingkan kelima kurva pada Gambar 5.1 dapat disimpulkan bahwa, perbedaan pengaruh *age hardening* (akibat pengaruh Zn dan Mg) pada variabel komposisi Cu terendah (0.4 at. %) paling jelas terlihat dibandingkan dengan perbedaan kurva dalam komposisi Cu yang lebih tinggi lainnya (0.7, 1.0, 1.3 dan 1.6 at. %). Hal ini ditunjukkan pada Gambar 5.1 (a) dimana tidak ada titik kurva (yang merepresentasikan nilai kekerasan) yang hampir bersinggungan antara paduan satu dengan yang lainnya.

Gambar 5.1 (a) menunjukkan nilai kekerasan tertinggi terjadi pada paduan dengan kadar Zn paling tinggi yaitu paduan Al-2.9Zn-2.9Mg-0.4Cu (at. %). Dengan demikian terbukti bahwa Zn dapat memberikan pengaruh yang signifikan pada presipitasi aluminium, terutama bila dipadukan dengan Mg dan Cu. Gambar 5.2 menunjukkan lebih jelas pengaruh Zn dan Mg melalui sajian data 3 dimensi (lihat Tabel 5.1), dalam kondisi *peak aged* setelah proses *ageing* selama 24 jam pada temperatur 120 °C.

**Tabel 5.1.** Nilai kekerasan puncak (HV) dua puluh paduan Al-Zn-Mg-Cu setelah proses *ageing* selama 24 jam pada temperatur 120 °C. Komposisi Zn (= Mg) dan Cu disajikan dalam at. %.

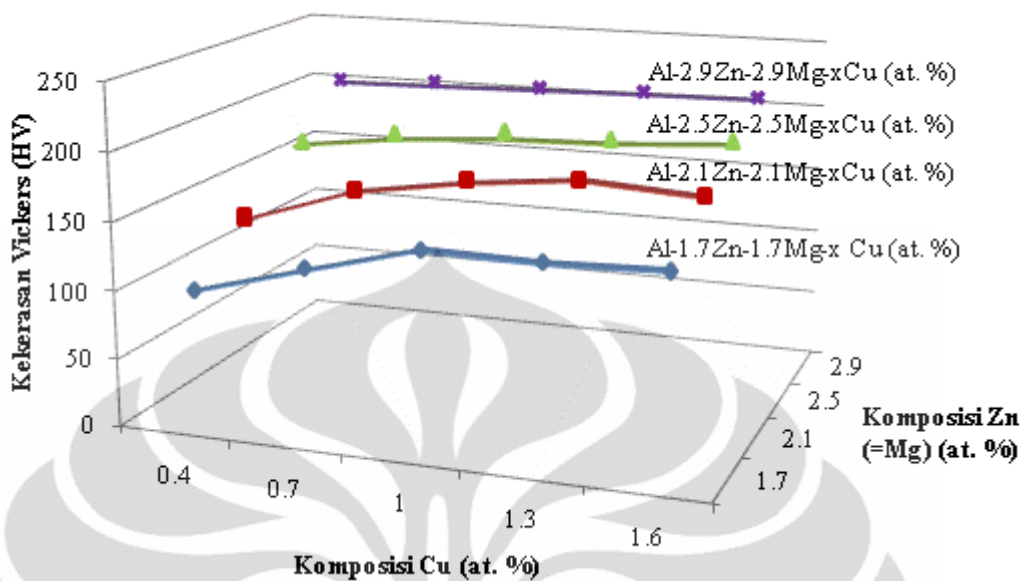
<b>Cu</b>	<b>0.4</b>	<b>0.7</b>	<b>1</b>	<b>1.3</b>	<b>1.6</b>
<b>Zn (= Mg)</b>					
<b>1.7</b>	93.93	116.89	139.41	137.99	140.85
<b>2.1</b>	126.91	154.46	167.56	176.38	171.45
<b>2.5</b>	166.36	177.08	182.91	185.41	190.99
<b>2.9</b>	202.12	203.8	205.9	207.81	209.11





**Gambar 5.1.** Respons pengerasan pada paduan (a) Al - x Zn - x Mg - 0.4 Cu, (b) Al - x Zn - x Mg - 0.7 Cu, (c) Al - x Zn - x Mg - 1.0 Cu, (d) Al - x Zn - x Mg - 1.3 Cu dan (e) Al - x Zn - x Mg - 1.6 Cu (at. %) selama *ageing* pada temperatur 120 °C.





**Gambar 5.2.** Kurva 3 dimensi dari pengaruh Zn dan Mg terhadap kekerasan puncak paduan Al-Zn-Mg-Cu setelah *ageing* selama 24 jam pada temperatur 120 °C.

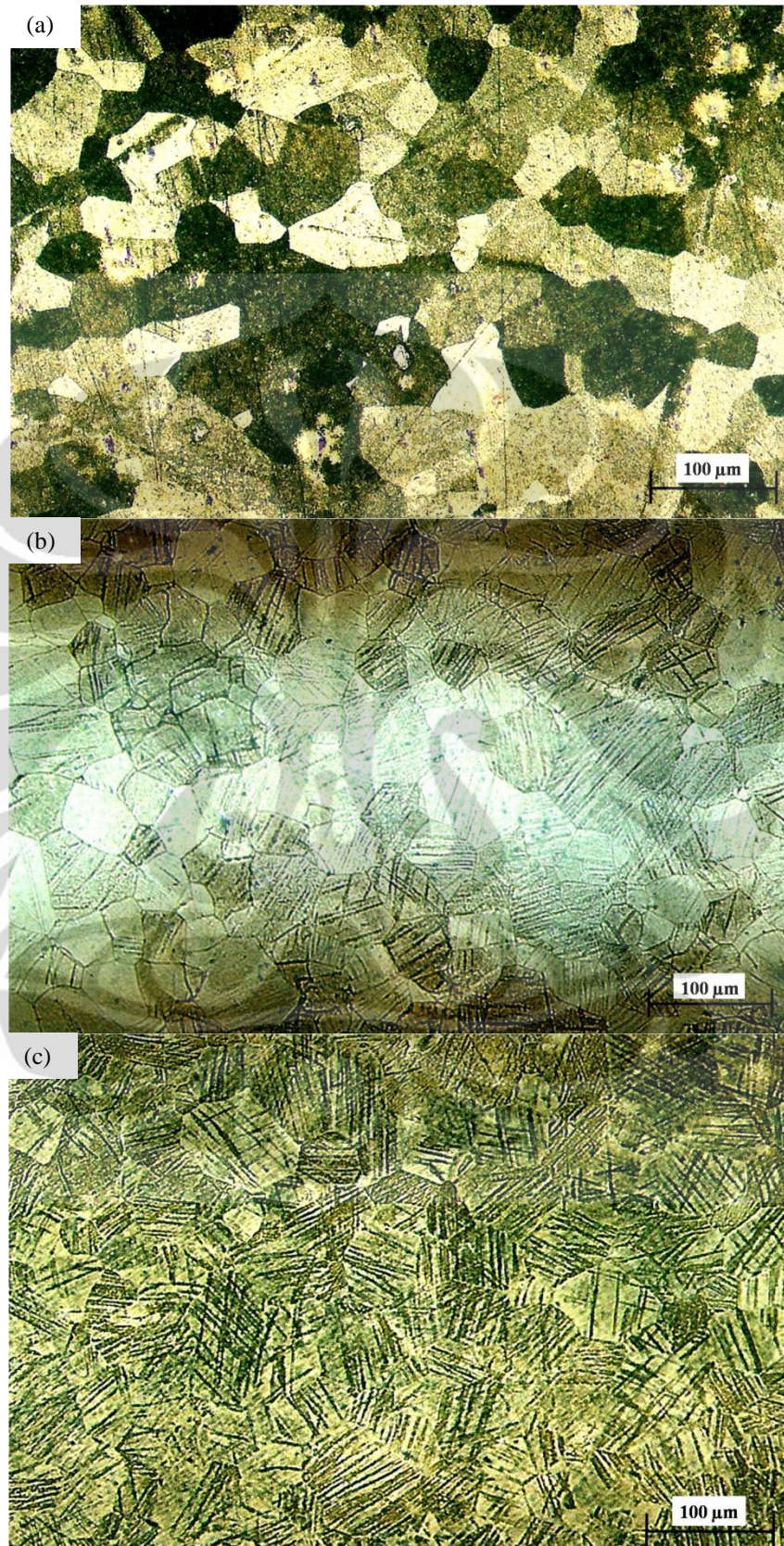
Gambar 5.2 menyajikan data yang lebih jelas mengenai pengaruh Zn dan Mg terhadap kekerasan puncak pada paduan Al-Zn-Mg-Cu setelah *ageing* selama 24 jam pada temperatur 120 °C. Kurva 3 dimensi pada Gambar 5.2 menunjukkan peningkatan kekerasan terjadi secara signifikan dengan adanya peningkatan kadar Zn sebesar 0.4 at. % pada setiap paduan dengan komposisi Cu yang tetap (0.4, 0.7, 1.0, 1.3 dan 1.6 at. %). Sebagai contoh pada paduan dengan kadar Cu tetap 0.4 at. %, meningkat dari 93.93 HV kemudian 126.91 HV, selanjutnya 166.36 HV hingga mencapai 202.13 HV dengan bertambahnya kadar Zn sebesar  $\pm 0.4$  at. % di setiap peningkatan nilai kekerasan puncaknya (lihat Gambar 5.1, Gambar 5.2 dan Tabel 5.1).

## 5.2 Evolusi Mikrostruktur selama *Ageing* pada Temperatur 120 °C

### 5.2.1 Observasi Struktur Mikro dengan Mikroskop Optik

Pengamatan evolusi mikrostruktur dengan mikroskop optik dilakukan untuk paduan Al-1.7Zn-1.7Mg-0.4Cu (at. %) pada kondisi *under*, *peak* dan *over aged* masing-masing setelah kondisi *ageing* selama 1 menit, 24 jam dan 1 minggu pada temperatur 120 °C. Perubahan mikrostruktur setelah *ageing* diamati melalui evolusi struktur butir seperti ditunjukkan pada Gambar 5.3 (a), (b) dan (c).





**Gambar 5.3.** Mikrostruktur paduan Al-1.7Zn-1.7Mg-0.4Cu (at. %) selama (a) 1 menit (b) 24 jam (c) 1 minggu *ageing* pada temperatur 120 °C dengan perbesaran 100X menggunakan etsa Keller's reagent.

Perubahan mikrostruktur akibat proses *ageing* terlihat dengan jelas pada pengamatan mikroskop optik paduan Al-1.7Zn-1.7Mg-0.4Cu (at. %), dimana pada struktur *under aged* bagian dalam butir masih belum terisi dengan garis-garis (lihat Gambar 5.3 (a)) yang diprediksikan merupakan *slip band*. *Slip band* adalah bidang tempat dislokasi meluncur. Dimana dengan pertambahan waktu *ageing* dapat mengakibatkan peningkatan energi pada *slip band*. Peningkatan energi akibat pengaruh panas dapat menyebabkan *slip band* bergerak membentuk *cross slip*. Pada awalnya orientasi *slip band* sejajar dalam setiap butir, namun dengan peningkatan energi *slip band* yang mengalami *cross slip* akan berubah orientasi menjadi tegak lurus satu sama lainnya. Jumlah *slip band* di bagian dalam butir ini meningkat dengan penambahan waktu *ageing* (lihat Gambar 5.3 (b) dan (c)). Pada kondisi *over ageing* penampakan *slip band* meningkat dan mengalami *cross slip* sehingga butir satu dan yang lainnya terlihat menyatu dan sulit dibedakan seperti ditunjukkan Gambar 5.3 (c).

*Slip band* yang ada di dalam butir setelah *ageing* selama 24 jam terlihat beragam. Ada butir dengan konsentrasi *slip band* yang cukup tinggi (lihat Gambar 5.3 (b)) di dalamnya, namun ada juga yang tidak menunjukkan adanya *slip band* di dalamnya seperti ditunjukkan pada Gambar 5.4. Kedua gambar ini (Gambar 5.3 (b) dan Gambar 5.4) diambil pada sampel yang sama, dan dengan kondisi etsa yang sama. Hal ini dapat disebabkan oleh deformasi yang tidak seragam pada saat proses pengerolan manual.

Analisis ukuran butir dilakukan dengan menggunakan perhitungan *intersection* tiga buah lingkaran standar pada butir dengan panjang total 500 mm sesuai dengan ASTM E 112 - 96<sup>[75]</sup>. Teknik perhitungan besar butir diawali dengan menentukan jumlah perpotongan garis lingkaran dengan batas butir. Selain itu, perlu juga dihitung jumlah *triple junction* atau perpotongan garis lingkaran dengan titik persimpangan butir (jika ada). Jumlah *intersection* garis lingkaran standar dihitung melalui Persamaan 5.1.

$$P = \text{jumlah triple junction (1.5)} + \text{jumlah intersection} \quad (5.1)$$

$$P = \text{jumlah intersection batas butir dengan garis uji}$$



Selanjutnya ditentukan jumlah *intercept* batas butir per satuan panjang unit dari garis uji ( $P_L$ ) melalui Persamaan 5.2. Kemudian dilakukan perhitungan rata-rata panjang *interception* ( $L_3$ ) melalui Persamaan 5.3.

$$P_L = \frac{P}{L_T/M} \quad (5.2)$$

$$L_3 = \frac{1}{P_L} \quad (5.3)$$

$P_L$  = jumlah *intercept* per mm.

$P$  = jumlah *intersection* batas butir dengan garis uji.

$L_T$  = panjang garis total (dalam penelitian ini yang digunakan 500 mm)

$M$  = perbesaran.

$L_3$  = panjang *intercept* rata-rata.

Pada tahap akhir nomor butir ASTM ( $G$ ) ditentukan dengan Persamaan 5.4. Contoh aplikasi penggunaan lingkaran standar untuk menentukan *intersection* dengan batas butir ditunjukkan pada Gambar 5.4. Perhitungan besar butir paduan Al-1.7Zn-1.7Mg-0.4Cu (at. %) pada kondisi *under*, *peak* dan *over aged* ditunjukkan pada Tabel 5.2.

$$G = [-6,646 \log (L_3) - 3,298] \quad (5.4)$$

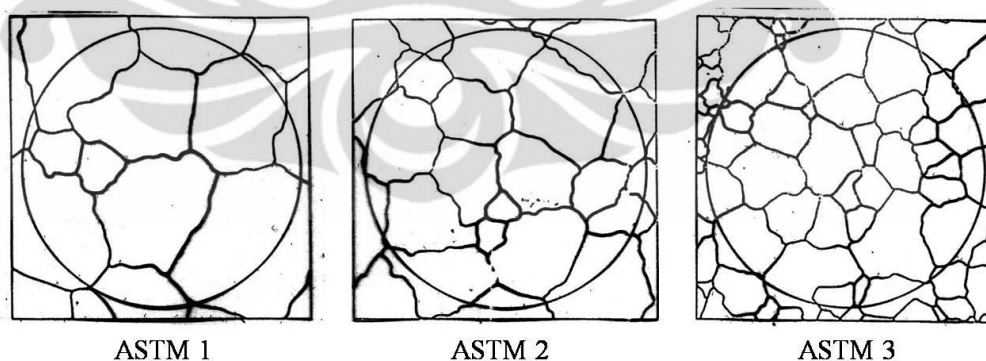


**Gambar 5.4.** Contoh penggunaan lingkaran standar ASTM E 112 – 96 untuk penentuan besar butir. Sampel di bawah lingkaran merupakan paduan Al-1.7Zn-1.7Mg-0.4Cu (at.%) setelah *ageing* selama 24 jam (tanpa garis presipitat di dalam butir) dengan perbesaran 100X menggunakan etsa Keller's reagent.

**Tabel 5.2.** Perhitungan ukuran butir paduan Al-1.7Zn-1.7Mg-0.4Cu (at.%) selama 1 menit, 24 jam dan 1 minggu *ageing* pada temperatur 120 °C.

Waktu <i>ageing</i>	1 menit	24 jam	1 minggu
	Perbesaran: 100x Jumlah <i>intersection</i> = 23 Jumlah <i>triple junction</i> = 0 $P = 0 (1.5) + 23 = 23$ $P_L = 23 / (500/100) = 4.6$ $L_3 = 1 / 4.6 = 0.217391304$ $G = [-6.646 \log (0.217391304) - 3.298 ] = 1.106688549 \approx \text{ASTM 1}$	Perbesaran: 100x Jumlah <i>intersection</i> = 33 Jumlah <i>triple junction</i> = 4 $P = 4 (1.5) + 33 = 39$ $P_L = 39 / (500/100) = 7.8$ $L_3 = 1 / 7.8 = 0.128205128$ $G = [-6.646 \log (0.128205128) - 3.298 ] = 2.630860729 \approx \text{ASTM 3}$	Perbesaran: 100x Jumlah <i>intersection</i> = 32 Jumlah <i>triple junction</i> = 0 $P = 0 (1.5) + 32 = 32$ $P_L = 32 / (500/100) = 6.4$ $L_3 = 1 / 6.4 = 0.15625$ $G = [-6.646 \log (0.15625) - 3.298 ] = 2.059872107 \approx \text{ASTM 2}$

Hasil perhitungan yang didapatkan sesuai dengan data literatur ukuran butir standar ASTM seperti ditunjukkan pada Gambar 5.5. Ukuran butir akan semakin kecil dengan bertambahnya nomor butir standar ASTM. Logam dengan struktur butir yang halus akan memiliki sifat mekanis yang lebih baik. Melalui perhitungan pada Tabel 5.2 diketahui bahwa pada kondisi *peak aged* struktur butirnya paling halus (ukuran butirnya ASTM 3) dibandingkan dengan kondisi *ageing* lainnya. Oleh karena itu kekerasan pada keadaan *peak aged* merupakan nilai yang paling tinggi dibandingkan dengan kondisi lainnya. Ukuran butir *over aged* lebih halus dibandingkan dengan kondisi *under aged* sehingga nilai kekerasannya akan lebih tinggi. Nilai kekerasan paduan Al-1.7Zn-1.7Mg-0.4Cu (at. %) setelah 1 menit, 24 jam dan 1 minggu *ageing* pada temperatur 120 °C berturut-turut adalah 53.4 HV, 93.93 HV dan 82.35 HV.



**Gambar 5.5.** Ukuran butir standar ASTM<sup>[76]</sup>.

### 5.2.2 Observasi Struktur Mikro dengan SEM, HRSEM dan EDS

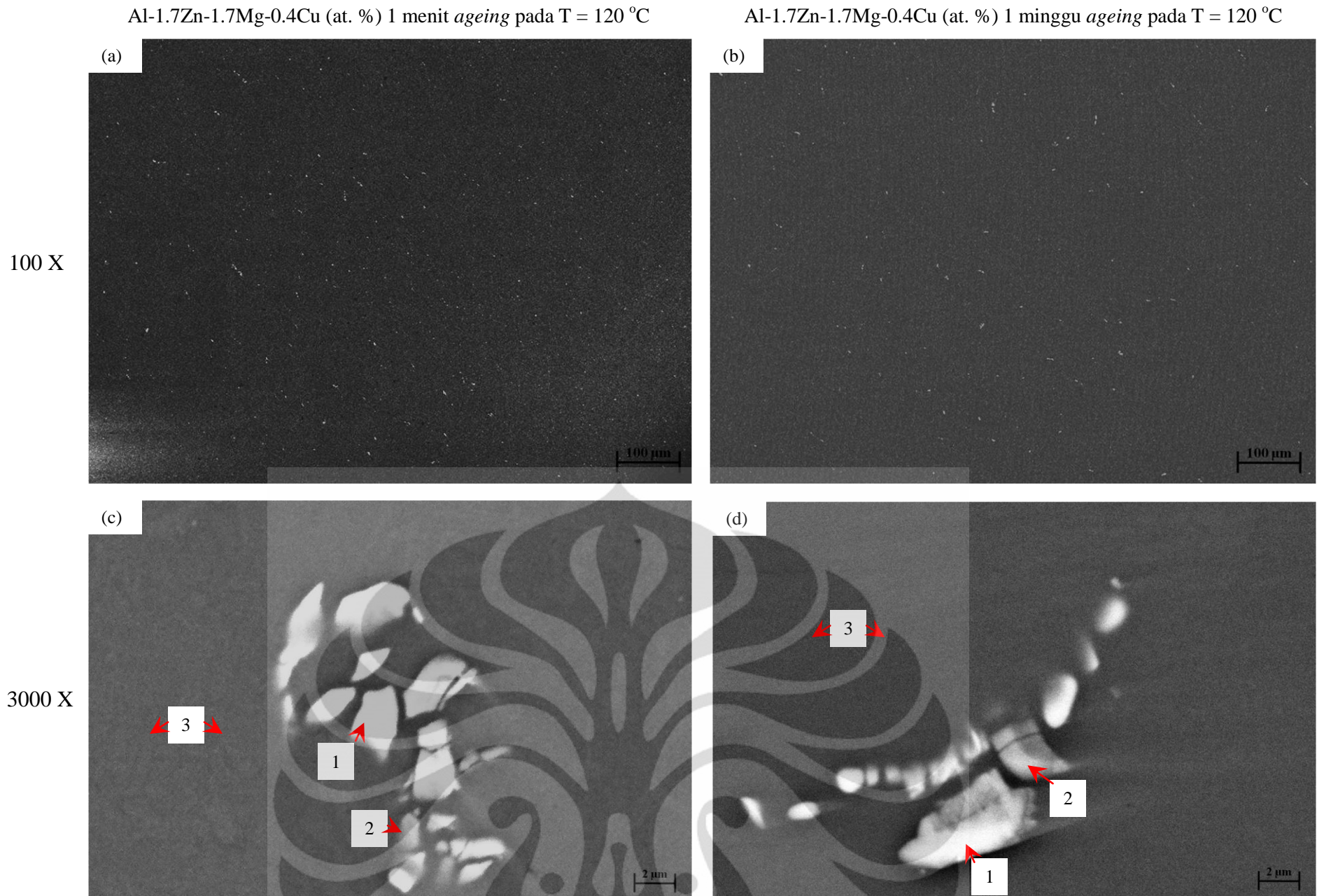
*Scanning Electron Microscope* (SEM) menyajikan data yang lebih lengkap mengenai evolusi mikrostruktur paduan Al-Zn-Mg-Cu setelah proses *ageing*. Kombinasi antara tingkat perbesaran (hingga 3000000X), *depth of field* yang lebih baik (< 4 mm) dan resolusi yang lebih besar (1-10 nm) serta adanya informasi

komposisi dan kristalografi material menjadikan SEM sebagai alat yang paling banyak digunakan baik untuk keperluan penelitian maupun industri.

Fasa yang mungkin muncul sebagai presipitat atau intermetalik berhubungan dengan elemen penyusun paduan. Analisis komposisi kimia (ICP) yang dilakukan terhadap 20 paduan Al-Zn-Mg-Cu ditunjukkan pada Tabel 4.2. Komposisi dari fasa yang mungkin ada dalam paduan Al-Zn-Mg-Cu diperoleh melalui pengukuran menggunakan *Energy Dispersive Spectroscopy* (EDS) yang terdapat pada SEM mengacu pada foto *Back Scattered Electron* (BSE) yang dihasilkan, sebagaimana yang tercantum pada Tabel 5.4 dan Tabel 5.5. Pengambilan data komposisi masing-masing fasa dilakukan berulang kali guna memperoleh hasil yang representatif. Permodelan fasa interdendritik dilakukan melalui perhitungan unsur mayoritas pembentuk fasa dengan pendekatan secara empiris dan mengabaikan nilai yang sangat kecil, untuk kemudian disesuaikan dengan referensi yang ada seperti ditunjukkan pada Tabel 2.7 pada butir 2.1.3.

Gambar 5.6 menunjukkan foto *Back Scattered Electron* (BSE) evolusi mikrostruktur dari paduan Al-1.7Zn-1.7Mg-0.4Cu (at. %) setelah proses *ageing* selama 1 menit (*under aged*) dan 1 minggu (*over aged*) pada temperatur 120 °C. Korelasi Gambar 5.6 (a) dan (b) pada perbesaran 100X dan Gambar (c) dan (d) dengan perbesaran 3000X memberikan informasi bahwa struktur presipitat dan intermetalik pada kondisi *under aged* sedikit lebih halus dibandingkan dengan kondisi *over aged*. Noda putih dalam kedua kondisi *ageing* ini menunjukkan adanya kandungan Fe yang cukup tinggi seperti ditunjukkan data hasil pengujian EDS pada Tabel 5.4 dan Tabel 5.5. Warna yang lebih terang pada foto BSE menunjukkan adanya presipitat dengan densitas yang lebih tinggi. Fasa dengan warna yang lebih terang dan ukuran yang lebih besar (ditunjukkan dengan nomor 1 pada Gambar 5.6 (c) dan (d)) diperkirakan adalah fasa intermetalik  $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}^{[39]}$ , dimana perlu dilakukan perhitungan lebih lanjut tentang perbandingan atomik pada fasa ini. Kadar Al yang terlampaui tinggi pada hasil pengujian EDS normal ditemukan sebagai efek dari penetrasi *X-Ray* yang terlalu dalam. Penetrasi yang terlalu dalam ini akan semakin besar dengan berkurangnya ukuran presipitat yang ingin diamati.





**Gambar 5.6.** Foto *Back Scattered Electron* (BSE) paduan Al-1.7Zn-1.7Mg-0.4Cu (at. %) selama *ageing* pada temperatur 120 °C pada kondisi (a) dan (c) *under aged* (b) dan (d) *over aged*.

**Tabel 5.3.** Rangkuman hasil EDS paduan Al-1.7Zn-1.7Mg-0.4Cu (at. %) 1 menit *ageing* pada temperatur 120 °C berdasarkan foto BSE (Gambar 5.6 (c))

No	Rata-rata unsur (at. %)						Fasa yang mungkin*)
	Zn	Mg	Cu	Fe	Si	Al	
1	--	--	1.96	8.71	--	87.06	Al <sub>7</sub> Cu <sub>2</sub> Fe
2	--	--	--	2.52	--	94.37	FeAl <sub>3</sub>
3	1.02	2.18	--	--	--	96.64	Al (matriks), di dalamnya mungkin ada Mg <sub>3</sub> Zn <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> , MgZn <sub>2</sub>

**Tabel 5.4.** Rangkuman hasil EDS paduan Al-1.7Zn-1.7Mg-0.4Cu (at. %) 1 minggu *ageing* pada temperatur 120 °C berdasarkan foto BSE (Gambar 5.6 (d))

No	Rata-rata unsur (at. %)						Fasa yang mungkin*)
	Zn	Mg	Cu	Fe	Si	Al	
1	--	--	0.65	5.66	--	87.12	Al <sub>7</sub> Cu <sub>2</sub> Fe
2	--	--	--	2.38	--	94.36	FeAl <sub>3</sub>
3	0.99	2.43	--	--	--	95.86	Al (matriks), di dalamnya mungkin ada Mg <sub>3</sub> Zn <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> , MgZn <sub>2</sub>

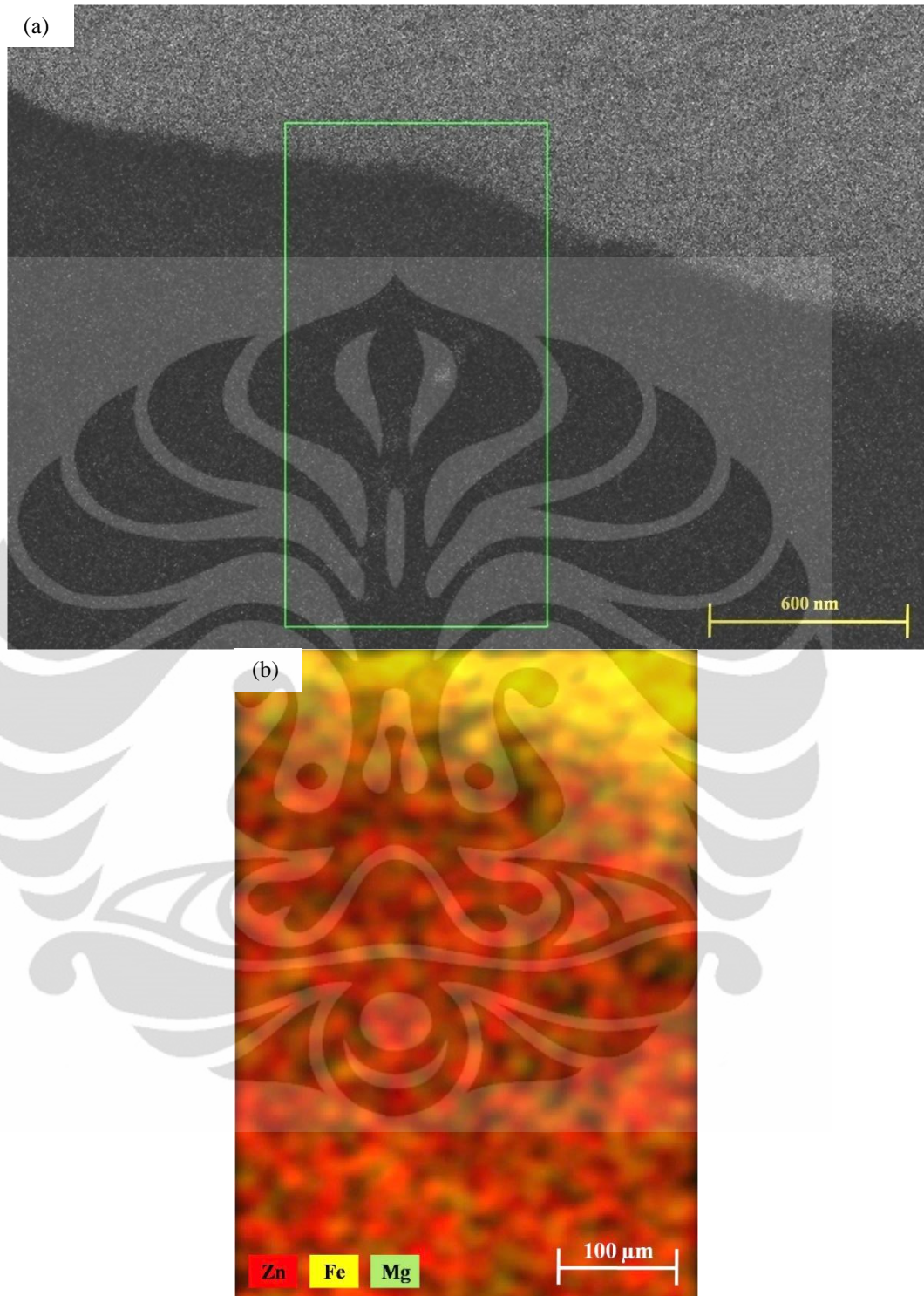
\*) Prediksi fasa didasarkan pada data fasa yang mungkin muncul dalam paduan Al-Zn-Mg<sup>[39]</sup> seperti ditunjukkan pada Tabel 2.7.

Fasa intermetalik  $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$  muncul pada kondisi *under* dan *peak aged*. Hal ini sesuai dengan penelitian Xi-Gang Fan *et al.*<sup>[15]</sup> yang mengobservasi adanya struktur  $\alpha$  (Al), eutektik ( $\alpha$  (Al) +  $\text{Mg}(\text{Al,Cu,Zn})_2$ ) dan fasa  $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$  pada struktur *as cast* paduan Al-Zn-Mg-Cu. Namun Fan *et al.* menemukan adanya pengaruh besar dari Cu pada pelarutan struktur eutektik dimana ditemukan fasa  $\text{Al}_2\text{CuMg}$  setelah perlakuan panas. Fasa ini tidak ditemukan dalam penelitian ini, namun melalui perbandingan data pada Tabel 5.4 dan Tabel 5.5 mengindikasikan bahwa Cu dan Fe larut selama proses perlakuan panas dimana konsentrasinya berkurang dari fasa  $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ .

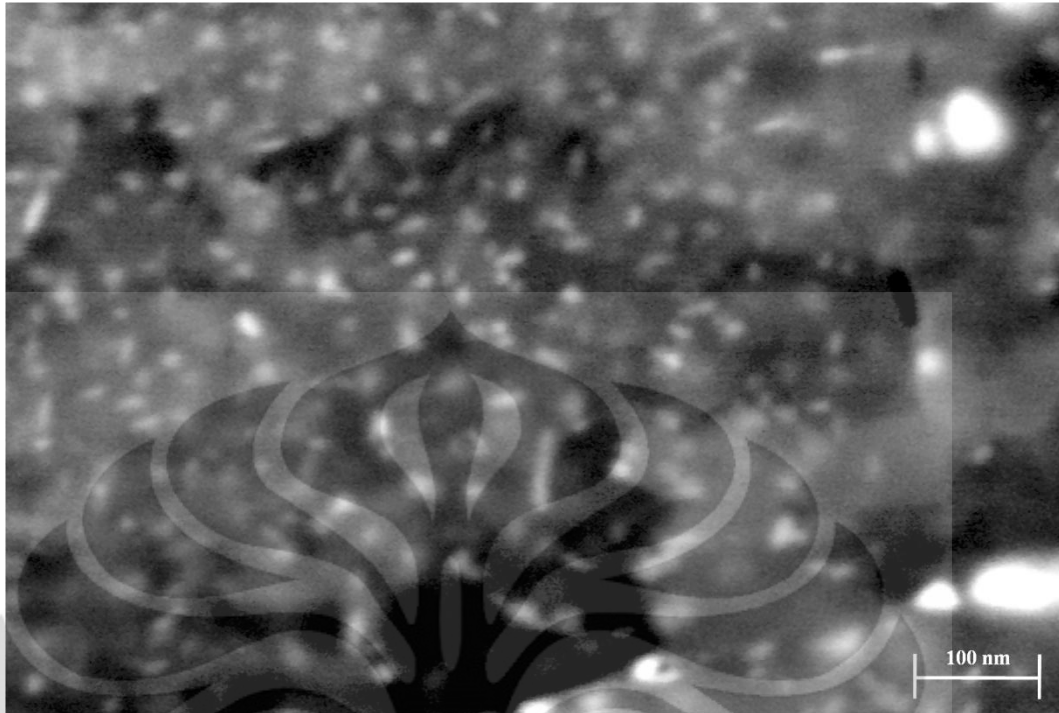
Ketika pengujian EDS dilakukan pada matriks, hasilnya menunjukkan adanya peningkatan kadar Zn dan Mg selain konsentrasi Al yang tinggi. Hal ini mengindikasikan presipitat yang terbentuk oleh elemen Zn dan Mg berukuran sangat kecil sehingga tidak dapat terlihat dengan pengamatan SEM. Presipitat sangat halus yang mungkin terbentuk di dalam matriks ini adalah  $\text{Mg}_3\text{Zn}_3\text{Al}_2$  atau  $\text{MgZn}_2$ <sup>[39]</sup>. Pengamatan dengan *High Resolution SEM* dan pemetaan *X-Ray* dilakukan untuk melihat penyebaran elemen Zn dan Mg di dalam matriks seperti ditunjukkan pada Gambar 5.7 dan Gambar 5.8. pemetaan *X-Ray* pada Gambar 5.7 memperlihatkan penyebaran elemen Zn dan Mg di dalam matriks. Daerah dengan kandungan Fe yang tinggi (di sudut kanan atas pada Gambar 5.7 (b)) merupakan daerah noda putih kaya-Fe yang diamati sebelumnya.

Gambar 5.8 menunjukkan perbesaran pada matriks sampai 350000X dengan menggunakan sinyal AsB pada HRSEM. Pengamatan pada foto ini menunjukkan adanya presipitat halus yang dibentuk oleh Zn dan Mg. Dikarenakan ukurannya yang sangat kecil, sehingga tidak memungkinkan untuk dilakukan pengujian EDS pada presipitat halus di dalam matriks tersebut. Melalui korelasi dengan pemetaan *X-Ray* pada Gambar 5.7 dan pengamatan SEM-EDS pada matriks (Gambar 5.6 (c) dan (d)), presipitat halus ini dimungkinkan adalah  $\text{Mg}_3\text{Zn}_3\text{Al}_2$  atau  $\text{MgZn}_2$ <sup>[39]</sup>.





**Gambar 5.7.** Foto (a) *Secondary Electron (SE)* dan (b) *X-Ray Mapping* paduan Al-1.7Zn-1.7Mg-0.4Cu (at. %) pada pengamatan dengan *High Resolution SEM* selama 1 minggu *ageing* pada temperatur 120 °C dengan perbesaran 104105 X.

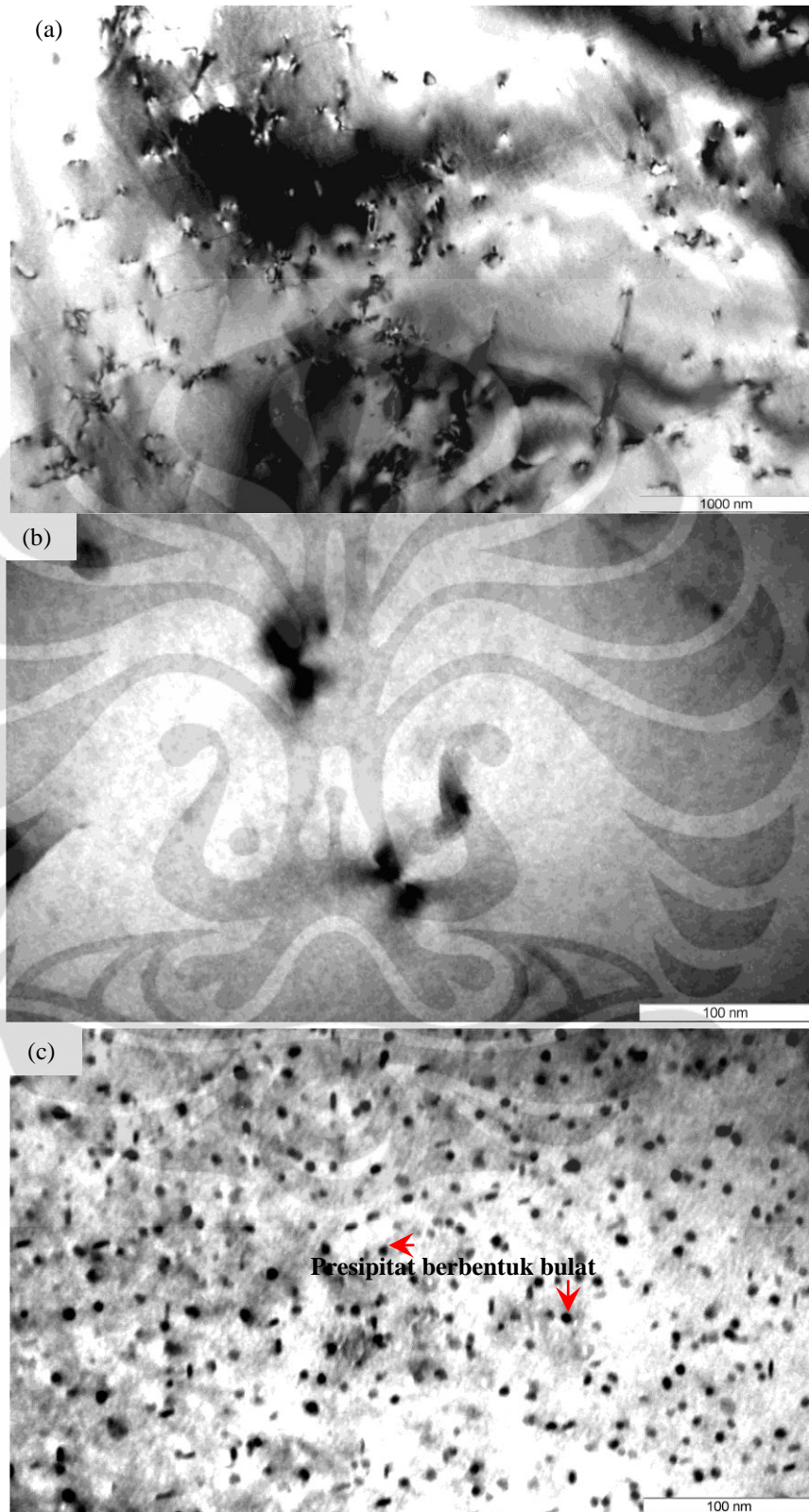


**Gambar 5.8.** Foto menggunakan sinyal AsB dengan inlens pada pengamatan dengan *High Resolution SEM* dari paduan Al-1.7Zn-1.7Mg-0.4Cu (at. %) selama 1 minggu *ageing* pada temperatur 120 °C dengan perbesaran 350000 X.

### 5.2.3 Observasi Struktur Nano dengan *Transmission Electron Microscope* (TEM)

Pengamatan struktur nano dilakukan dengan menggunakan TEM untuk mengungkap evolusi presipitat paduan Al-Zn-Mg-Cu yang mengalami penguatan setelah proses *ageing* pada temperatur 120 °C. Pengamatan dilakukan pada spesimen dalam kondisi *under aged* (1 menit *ageing*) dan *peak aged* (24 jam *ageing*) seperti ditunjukkan pada Gambar 5.9 (a), (b) dan (c). Resolusi yang lebih baik dihasilkan oleh TEM dapat digunakan untuk lebih menjelaskan presipitat halus pada matriks yang ditunjukkan pada Gambar 5.8 sebelumnya.

Evolusi mikrostruktur terlihat dalam paduan Al-1.7Zn-1.7Mg-0.4Cu (at. %) setelah *ageing* selama 1 menit dan 24 jam pada temperatur 120 °C. Pada kondisi *under aged* (1 menit *ageing*) terlihat *cluster* presipitat (lihat Gambar 5.9 (a) dan (b)) yang akan tumbuh dan semakin tersebar merata dengan ukuran yang sangat halus selama proses *ageing*. Kondisi presipitat yang terdistribusi cukup merata dengan bentuk mendekati *spherical* ditemukan pada spesimen dalam keadaan *peak aged* (lihat Gambar 5.9 (c)).



**Gambar 5.9.** *Bright field transmission electron micrograph* paduan Al-1.7Zn-1.7Mg-0.4Cu (at. %) selama (a), (b) 1 menit (c) 24 jam *ageing* pada temperatur 120 °C dengan arah standar  $\langle 110 \rangle_{\alpha}$ .



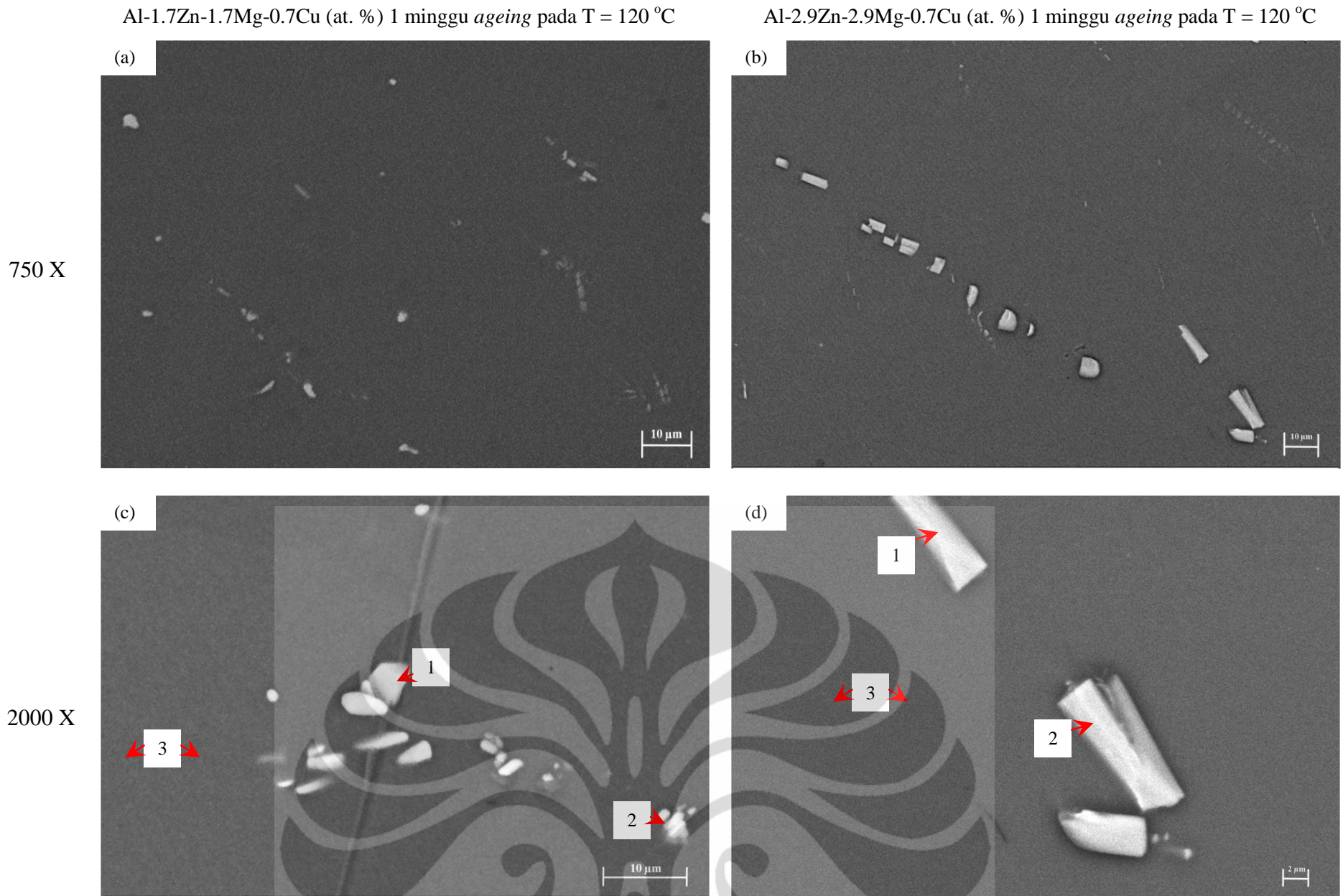
Melalui pengamatan *cluster* nano pada TEM dan observasi struktur mikro dengan SEM dan EDS (adanya konsentrasi elemen Mg dan Zn pada matriks dalam jumlah yang signifikan (lihat Tabel 5.4 dan Tabel 5.5)), serta pembuktian adanya presipitat yang sangat halus di dalam matriks dengan HRSEM (lihat Gambar 5.8) dan TEM (lihat Gambar 5.9 (c)), dapat dikonfirmasi evolusi presipitat dalam paduan Al-Zn-Mg-Cu pada penelitian ini sesuai dengan Persamaan 5.5 sebagai berikut:



### 5.3 Pengaruh Zn dan Mg terhadap Evolusi Mikrostruktur Paduan Al-Zn-Mg-Cu selama Ageing pada Temperatur 120 °C

Pengaruh Zn terhadap evolusi mikrostruktur diamati dengan menggunakan SEM dan EDS serta pemetaan *X-Ray* pada paduan dengan kadar Cu tetap yaitu 0.7 at. %. Kandungan Zn dan Mg diambil pada paduan dengan kadar terendah yaitu 1.7 at. % dan tertinggi yaitu 2.9 at. %. Pengamatan dilakukan pada spesimen kondisi *over aged* setelah 1 minggu *ageing*, mengingat tidak banyak yang bisa diamati pada kondisi *under aged* dan *peak aged* melalui observasi dengan menggunakan peralatan resolusi rendah. Perbedaan pengaruh Zn dan Mg dalam paduan Al-1.7Zn-1.7Mg-0.7Cu dan Al-2.9Zn-2.9Mg-0.7Cu (at. %) ditunjukkan pada Gambar 5.10 dan Gambar 5.11.

Tabel 5.7 dan Tabel 5.8 menunjukkan bahwa konsentrasi Zn dan Mg meningkat di dalam matriks bersamaan dengan peningkatan kadar Zn dan Mg dalam paduan. Dengan bertambahnya kadar Zn dan Mg dalam matriks maka jumlah presipitat halus  $\text{Mg}_3\text{Zn}_3\text{Al}_2$ ,  $\text{MgZn}_2$  ( $\eta$ ) juga akan semakin banyak. Presipitat halus ini dapat meningkatkan sifat mekanis secara signifikan. Paduan dengan kadar Zn dan Mg sebesar 1.7 at. % menghasilkan kekerasan 116.89 HV dengan peningkatan kadar Zn dan Mg menjadi 2.9 at. % kekerasan meningkat drastis mencapai 203.8 HV dengan jumlah Cu yang sama yaitu sebesar 0.7 at. % pada kondisi *peak aged* (lihat Tabel 5.1).



**Gambar 5.10.** Foto *Back Scattered Electron* (BSE) paduan (a) Al-1.7Zn-1.7Mg-0.7Cu (b) Al-2.9Zn-2.9Mg-0.7Cu (at. %) selama 1 minggu *ageing* pada temperatur 120 °C.

**Tabel 5.5.** Rangkuman hasil EDS paduan Al-1.7Zn-1.7Mg-0.7Cu (at. %) 1 menit *ageing* pada temperatur 120 °C berdasarkan foto BSE (Gambar 5.6 (c))

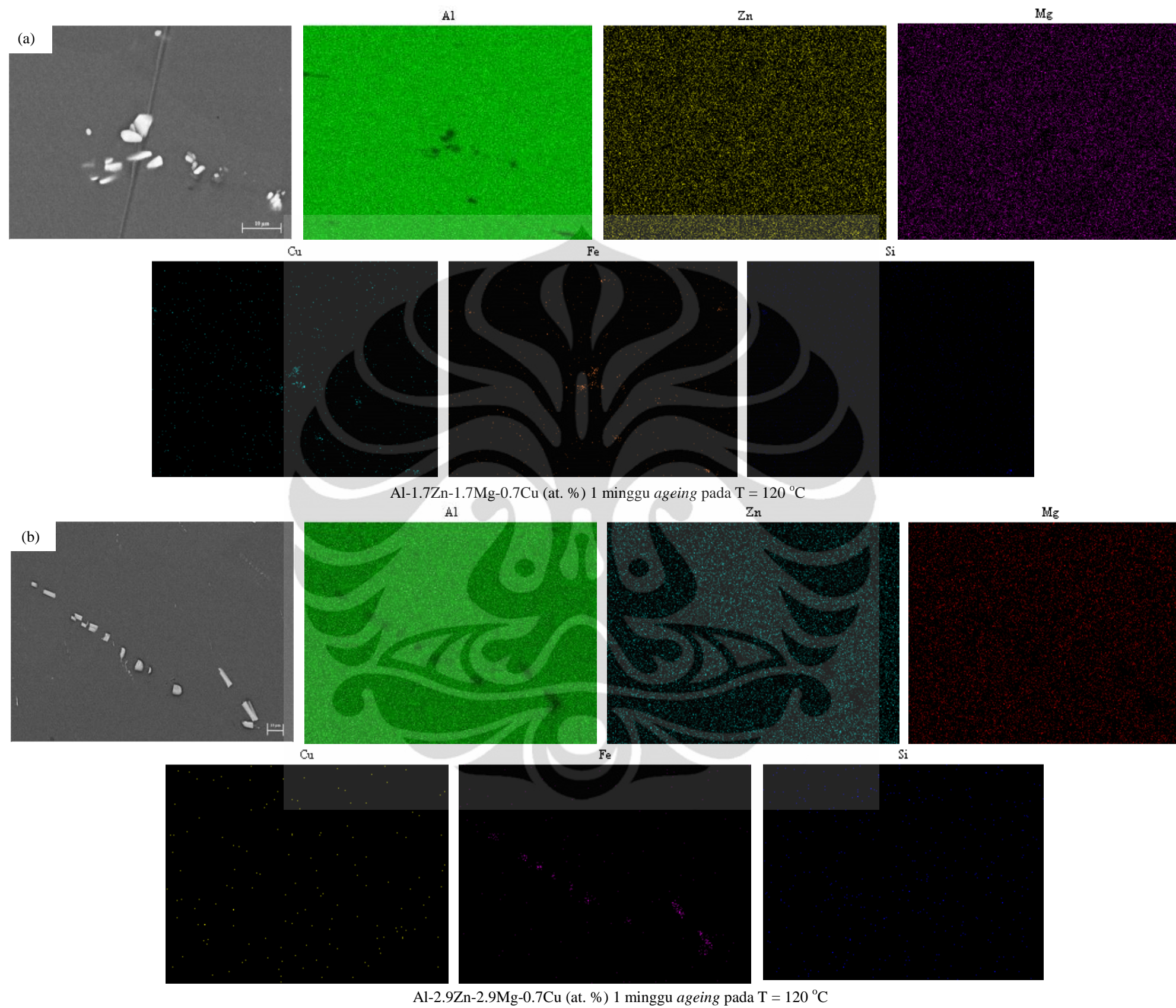
No	Rata-rata unsur (at. %)						Fasa yang mungkin*)
	Zn	Mg	Cu	Fe	Si	Al	
1	--	--	13.04	6.47	--	78.99	Al <sub>7</sub> Cu <sub>2</sub> Fe
2	--	--	9.718	4.47	--	83.55	Al <sub>7</sub> Cu <sub>2</sub> Fe
3	1.25	2.4	--	--	--	95.81	Al (matriks), di dalamnya mungkin ada Mg <sub>3</sub> Zn <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> , MgZn <sub>2</sub>

**Tabel 5.6.** Rangkuman hasil EDS paduan Al-2.9Zn-2.9Mg-0.7Cu (at. %) 1 minggu *ageing* pada temperatur 120 °C berdasarkan foto BSE (Gambar 5.6 (d))

No	Rata-rata unsur (at. %)						Fasa yang mungkin*)
	Zn	Mg	Cu	Fe	Si	Al	
1	--	--	--	13.26	--	78.42	FeAl <sub>3</sub>
2	--	--	--	14.29	--	76.81	FeAl <sub>3</sub>
3	2.04	3.18	--	--	--	92.89	Al (matriks), di dalamnya mungkin ada Mg <sub>3</sub> Zn <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> , MgZn <sub>2</sub>

\*) Prediksi fasa didasarkan pada data fasa yang mungkin muncul dalam paduan Al-Zn-Mg<sup>[39]</sup> seperti ditunjukkan pada Tabel 2.7.





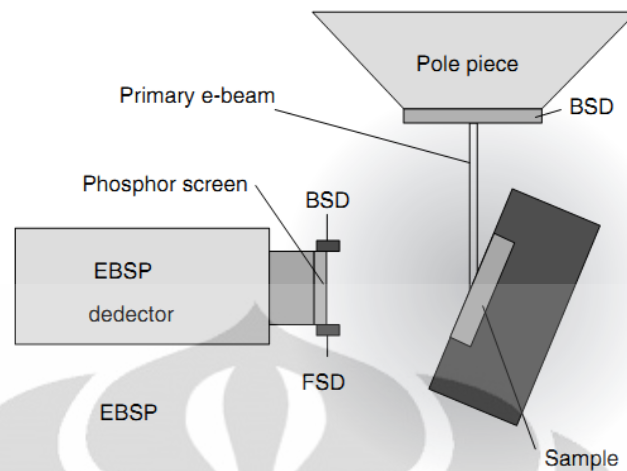
**Gambar 5.11.** Pemetaan *X-Ray* paduan (a) Al-1.7Zn-1.7Mg-0.7Cu (b) Al-2.9Zn-2.9Mg-0.7Cu (at. %) selama 1 minggu *ageing* pada temperatur  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Foto pemetaan *X-Ray* menunjukkan bahwa penyebaran Zn dan Mg di dalam matriks terlihat sama-sama seragam antara paduan Al-1.7Zn-1.7Mg-0.7Cu dengan Al-2.9Zn-2.9Mg-0.7Cu (at. %). Melalui komparasi pengamatan pemetaan *X-Ray* pada Gambar 5.11 dengan hasil pengujian EDS pada 5.10 (c) dan (d) dikonfirmasi bahwa tidak ditemukan kehadiran fasa  $Al_7Cu_2Fe$  dalam paduan Al-2.9Zn-2.9Mg-0.7Cu (at. %). Elemen Cu terlihat tidak mengumpul di dalam noda putih pada pengamatan pemetaan *X-Ray* paduan Al-2.9Zn-2.9Mg-0.7Cu (at. %). Hal ini memberikan gambaran bahwa, benar pada paduan Al-Zn-Mg-Cu, Cu dan Al menggantikan Zn pada  $MgZn_2$  membentuk  $Mg(Zn,Cu,Al)_2$ <sup>[17,26]</sup>. Penyebaran atom Cu dalam paduan dimungkinkan dengan terbentuknya fasa  $Al_2CuMg$  melalui dekomposisi eutektik dan presipitasi fasa padat.

Penambahan Zn dan Mg akan meningkatkan kekuatan, namun di sisi lain akan menurunkan ketahanan korosi material. Efek-efek merugikan seng lainnya adalah menurunkan kemampuan cor, meningkatkan kecenderungan terjadinya *stress corrosion cracking*, *shrinkage*, dan retak panas<sup>[30]</sup>. Peningkatan kekerasan paduan Al-Zn-Mg-Cu akibat penambahan Zn dan Mg disebabkan oleh semakin bertambahnya presipitat halus  $Mg_3Zn_3Al_2$ ,  $MgZn_2$  yang terbentuk pada matriks aluminium.

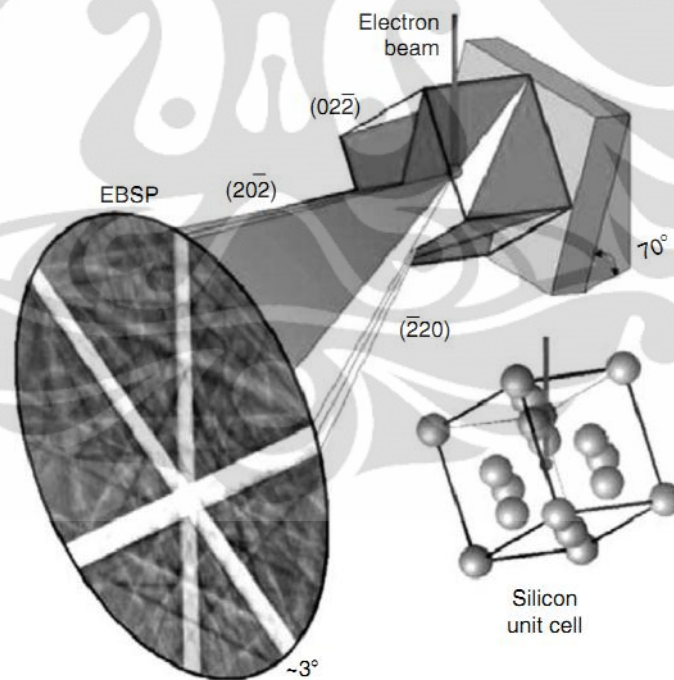
#### **5.4 Teknik Difraksi *Back Scatter Electron* (BSE) untuk Karakterisasi Sampel**

Teknik yang dikenal dengan nama EBSD (*Electron Backscatter Diffraction*) ini merupakan penggabungan teknik SEM dengan aksesoris sistem yang ada di dalam SEM itu sendiri. EBSD dapat digunakan untuk menyajikan informasi kuantitatif mengenai struktur kristalografi dari logam. Teknik EBSD dilakukan pada sampel datar yang telah *dipolish* (dalam penelitian ini sampel telah *dielectropolishing* dengan elektrolit 30 vol. %  $HNO_3$  dalam metanol). Sampel dikenai tumbukan elektron pada sudut yang kecil, biasanya  $20^\circ$  seperti ditunjukkan pada Gambar 5.12.



**Gambar 5.12.** Susunan skematik arah sampel pada SEM untuk teknik EBSD<sup>[77]</sup>.

Tegangan akselerasi sebesar 10-30 kV dan arus tumbukan *beam* sebesar 1-50 nA menyebabkan terjadinya difraksi elektron dari titik tumbukan pada permukaan sampel. Dengan *stationary beam* pola EBSD keluar secara *spherically* dari titik tumbukan, seperti ditunjukkan pada Gambar 5.13.



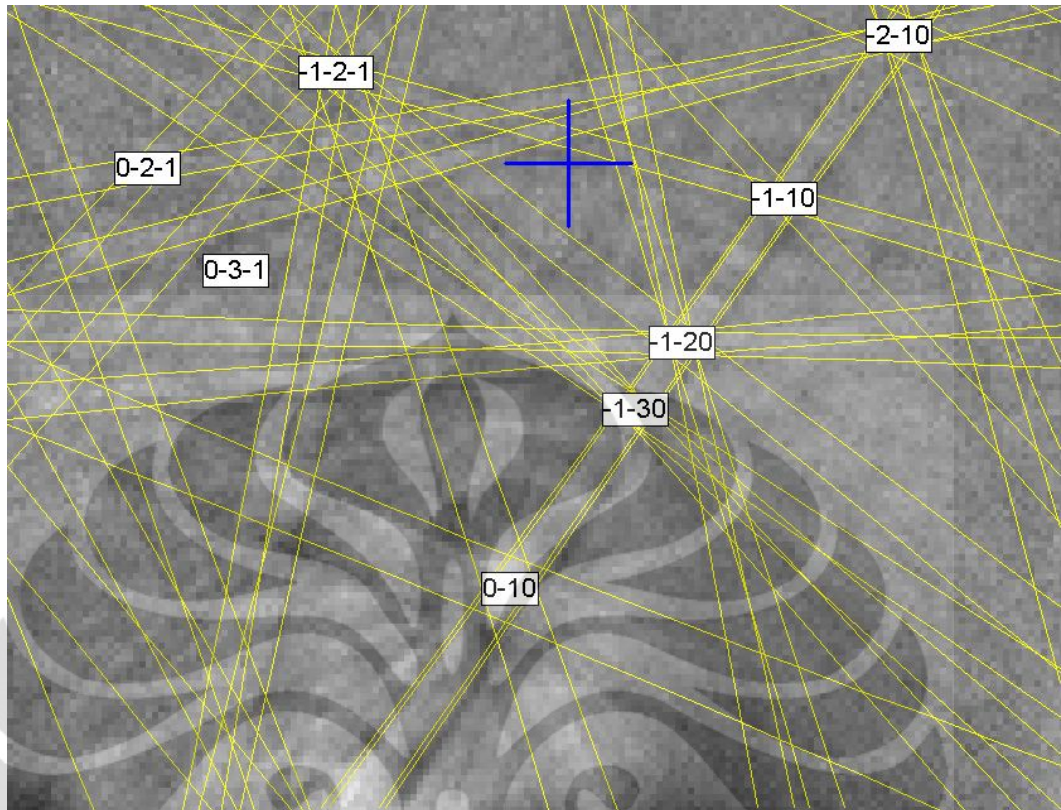
**Gambar 5.13.** Interaksi elektron dengan material kristalin<sup>[77]</sup>.



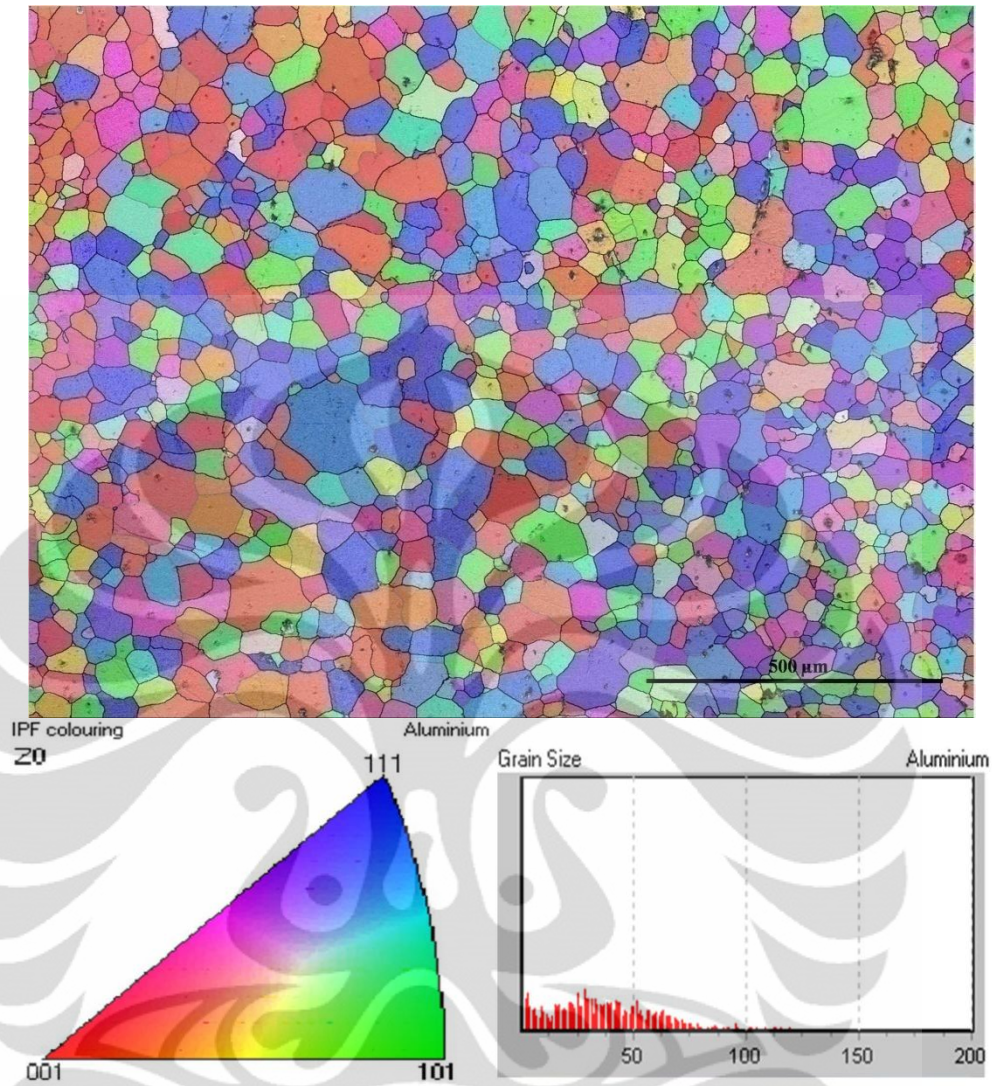
Pola difraksi yang unik ditentukan oleh parameter kisi yang tertentu untuk setiap kristal yang mengalami tumbukan *beam*. Aplikasi komputer khusus menganalisis pola difraksi BSE ini dengan cara mendeteksi jumlah Kikuchi *band* menggunakan transformasi Hough. Transformasi Hough akan mempengaruhi kualitas dari difraksi BSE (yang juga tergantung pada Kikuchi *band*) dalam pembentukan *band contrast* (BC). Skala nilai *band contrast* berkisar antara 0-255 (dari nilai yang paling rendah ke tinggi). Melalui perbedaan kontras ini dapat dihasilkan gambar 2 dimensi yang merepresentasikan bentuk dan ukuran butir.

Komponen orientasi gambar kutub *inverse* (*inverse pole figure*, IPF) dilakukan menggunakan pewarnaan dasar RGB. Untuk struktur kubik, warna merah, hijau dan biru berturut-turut menunjukkan butir pada sumbu  $\langle 100 \rangle$ ,  $\langle 110 \rangle$  atau  $\langle 111 \rangle$ , paralel pada arah proyeksi IPF. Pemetaan IPF ini digunakan untuk mengetahui arah orientasi paralel dengan sampel yang lebih disukai untuk pertumbuhan presipitat.

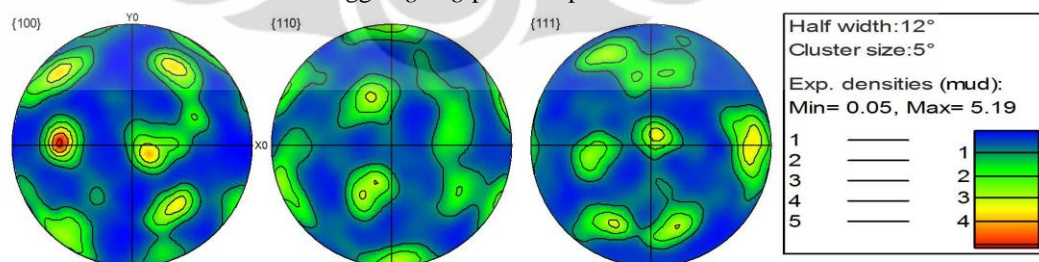
Pengamatan bentuk dan ukuran butir disertai dengan arah orientasi yang disukai paduan Al-2.9Zn-2.9Mg-0.7Cu (at. %) setelah 1 minggu *ageing* pada temperatur 120 °C ditunjukkan oleh Gambar 5.15. Kikuchi *band* sebagai interaksi elektron dengan kristal logam pada paduan Al-2.9Zn-2.9Mg-0.7Cu (at. %) yang nantinya akan membentuk pola difraksi BSE ditunjukkan pada Gambar 5.14. Pengujian pada sampel dilakukan selama 12 jam dengan menggunakan *High Resolution SEM Zeiss ULTRA plus Gemini*. Melalui pengamatan pada Gambar 5.15 diperoleh informasi bahwa bentuk butir cukup beragam dan berada pada orientasi yang berbeda-beda. Ukuran butir rata-rata berkisar antara 25-30  $\mu\text{m}$ . Arah orientasi presipitat (ditunjukkan dengan densitas yang tinggi) ditunjukkan pada Gambar 5.16. Melalui deskripsi IPF pada Gambar 5.1 ini diketahui bahwa arah orientasi yang disukai adalah  $\langle 100 \rangle$  dan  $\langle 111 \rangle$  paralel dengan permukaan tekstur normal dari sampel. Perlu dilakukan analisis lebih dalam untuk memahami orientasi yang disukai ini serta hubungannya dengan proses pengerolan dan *ageing* yang dialami sampel.



**Gambar 5.14.** Kikuchi *band* pada paduan Al-2.9Zn-2.9Mg-0.7Cu (at. %) selama 1 minggu *ageing* pada temperatur 120 °C. Kikuchi *band* merupakan bentuk interaksi elektron dengan kristal logam yang menjadi dasar pembentukan pola difraksi BSE.



**Gambar 5.15.** Distribusi bentuk dan ukuran butir paduan Al-2.9Zn-2.9Mg-0.7Cu (at. %) selama 1 minggu *ageing* pada temperatur 120 °C.



**Gambar 5.16.** Kontur gambar kutub paduan Al-2.9Zn-2.9Mg-0.7Cu (at. %) selama 1 minggu *ageing* pada temperatur 120 °C, menunjukkan arah  $\langle 100 \rangle$  dan  $\langle 111 \rangle$  paralel dengan tekstur permukaan normal memiliki densitas yang tinggi (lihat gambaran densitas melalui perbedaan warna).



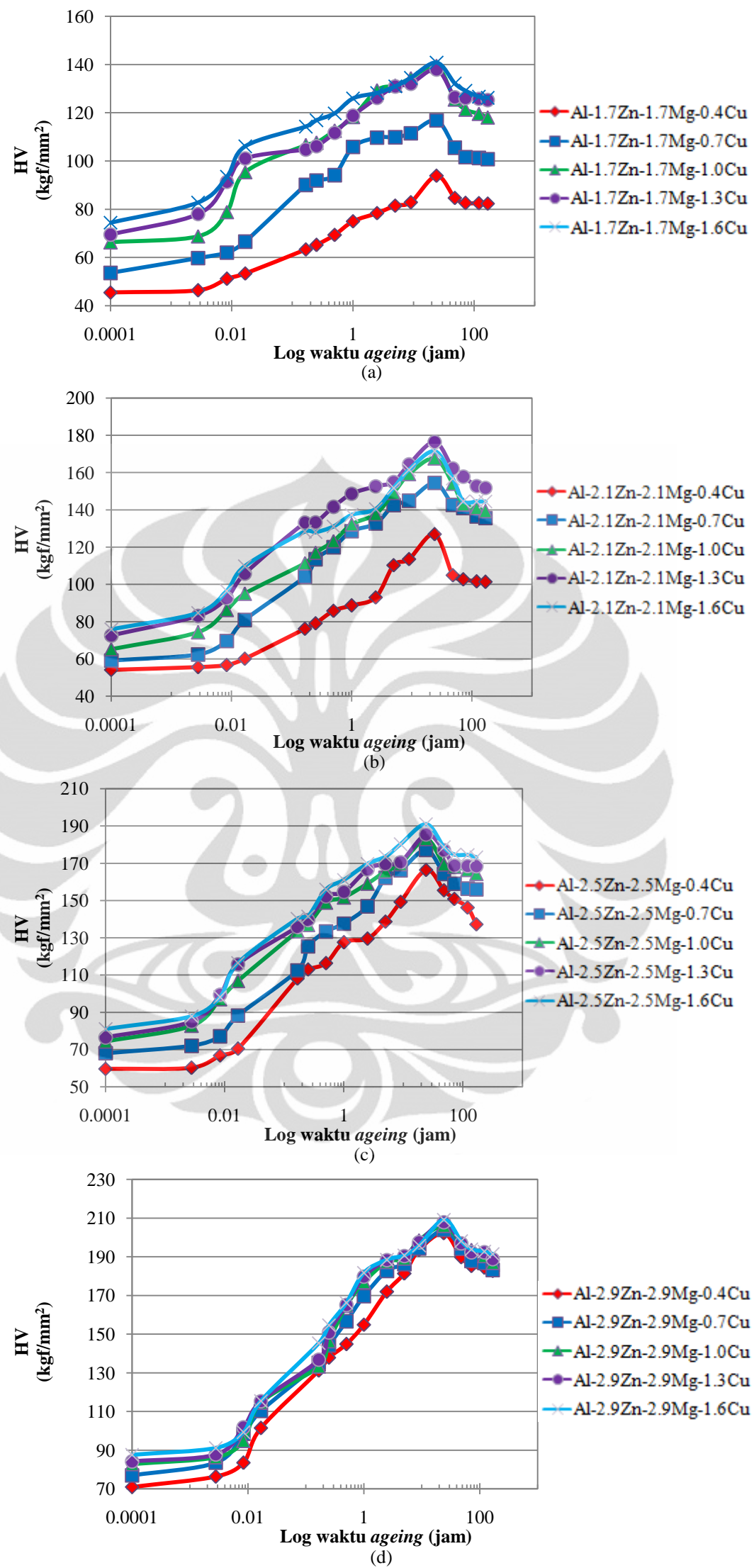
## BAB 6

### ANALISIS PENGARUH Cu DALAM PADUAN AL-Zn-Mg-Cu SELAMA AGEING PADA TEMPERATUR 120 °C

#### 6.1 Analisis Kurva *Age Hardening*

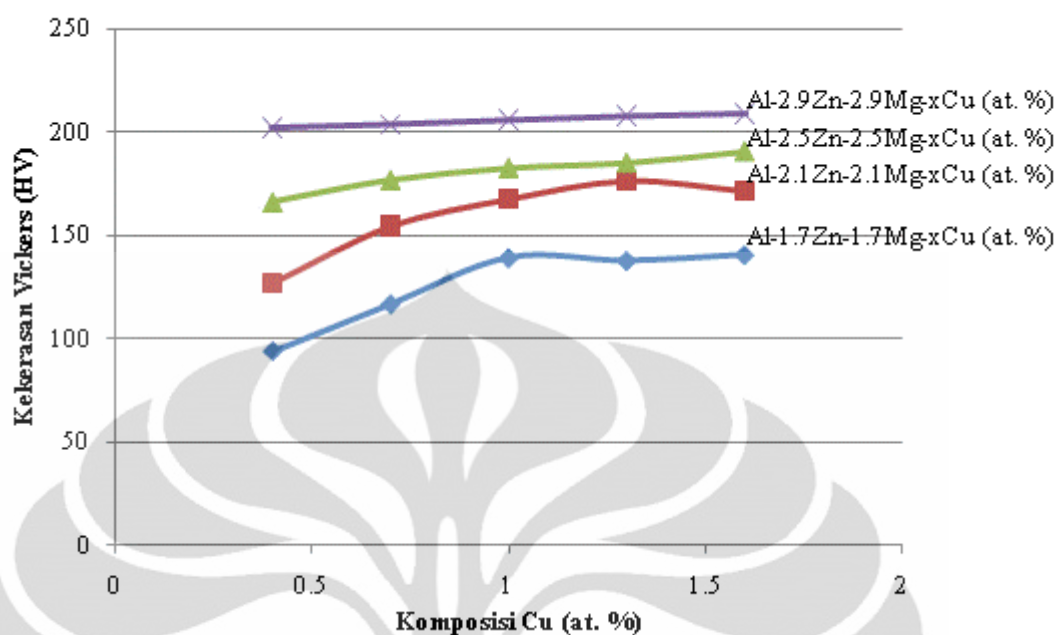
Penambahan Cu dapat meningkatkan efek *age hardening* pada paduan Al-Zn-Mg secara signifikan<sup>[42]</sup>. Hadjadj & Amira<sup>[7]</sup> melalui pengamatan mikroskop optik menunjukkan bahwa tembaga (Cu) dan magnesium (Mg) berkolaborasi memberikan efek pengurangan dimensi butir yang berkorespondensi terhadap perbaikan sifat mekanis, dimana terjadi peningkatan kekerasan mikro paduan Al-Zn-Mg-Cu. 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<sup>[9]</sup>.

Pengaruh Cu terhadap peningkatan kekerasan 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 6.1. Melalui perbandingan pada Gambar 6.1 (a), (b), (c) dan (d) diperoleh informasi bahwa peningkatan kadar Cu pada konsentrasi Zn dan Mg yang tinggi (misal konsentrasi Zn dan Mg adalah 2.9 at. % seperti ditunjukkan pada Gambar 6.1 (d)) tidak terlalu memberikan efek peningkatan kekerasan yang signifikan bagi paduan Al-Zn-Mg. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 6.2 yang merupakan grafik *scatter* dari sajian data 3 dimensi pada Tabel 5.1. Penambahan Cu tidak diperlukan lagi bagi pengerasan paduan aluminium seri 7xxx dengan kadar Zn dan Mg yang tinggi. Hal ini sesuai dengan pernyataan Mondolfo *et al.* yang menyebutkan batas komposisi Cu untuk paduan Al-Zn-Mg adalah sebesar 0-3 wt. %, atau kurang dari 1.3 at. %<sup>[39]</sup>. Pengecoran paduan Al-Zn-Mg-Cu dari *ingot* harus memperhatikan konsentrasi Cu guna menentukan waktu pelarutan Cu yang sesuai (lihat Tabel 4.1) dalam pemaduan untuk menghindari *undissolved* Cu. Kadar Cu yang tinggi disertai dengan peningkatan kadar Zn dan Mg juga dapat mempengaruhi kemampu-bentukan logam. Cacat pengerolan meningkat akibat kegetasan *billet* dengan kadar Zn, Mg dan Cu yang tinggi seperti ditunjukkan data pada Tabel 4.3.



Gambar 6.1. Respons 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 6.2.** Kurva *scatter* dari sajian data 3 dimensi pada Tabel 5.1 yang merepresentasikan kekerasan puncak paduan Al-Zn-Mg-Cu setelah *ageing* selama 24 jam pada temperatur 120 °C.

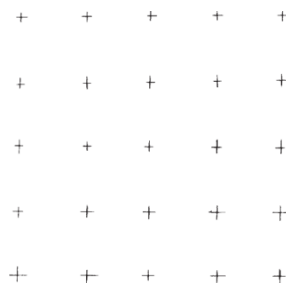
Gambar 6.2 menunjukkan pada konsentrasi Zn dan Mg yang tinggi, yaitu sekitar 2.9 at. %, penambahan kadar Cu tidak berpengaruh signifikan terhadap peningkatan kekerasan paduan. Berbeda dengan keadaan ketika Zn dan Mg berada pada konsentrasi 1.7 at. % dan 2.1 at. % dapat dilihat peningkatan terjadi cukup signifikan setiap penambahan 0.3 at. % Cu. Namun demikian, penambahan kadar Cu untuk peningkatan kekerasan yang signifikan terbatas sampai komposisi Cu = 1.3 at. % untuk semua paduan. Penambahan lebih dari 1.3 at. % (atau lebih dari 3 wt. %<sup>[39]</sup>) tidak diaplikasikan pada paduan komersil Al-Zn-Mg karena batasan efek peningkatan kekuatan material.

## 6.2 Pengaruh Cu terhadap Evolusi Mikrostruktur Paduan Al-Zn-Mg-Cu selama *Ageing* pada Temperatur 120 °C

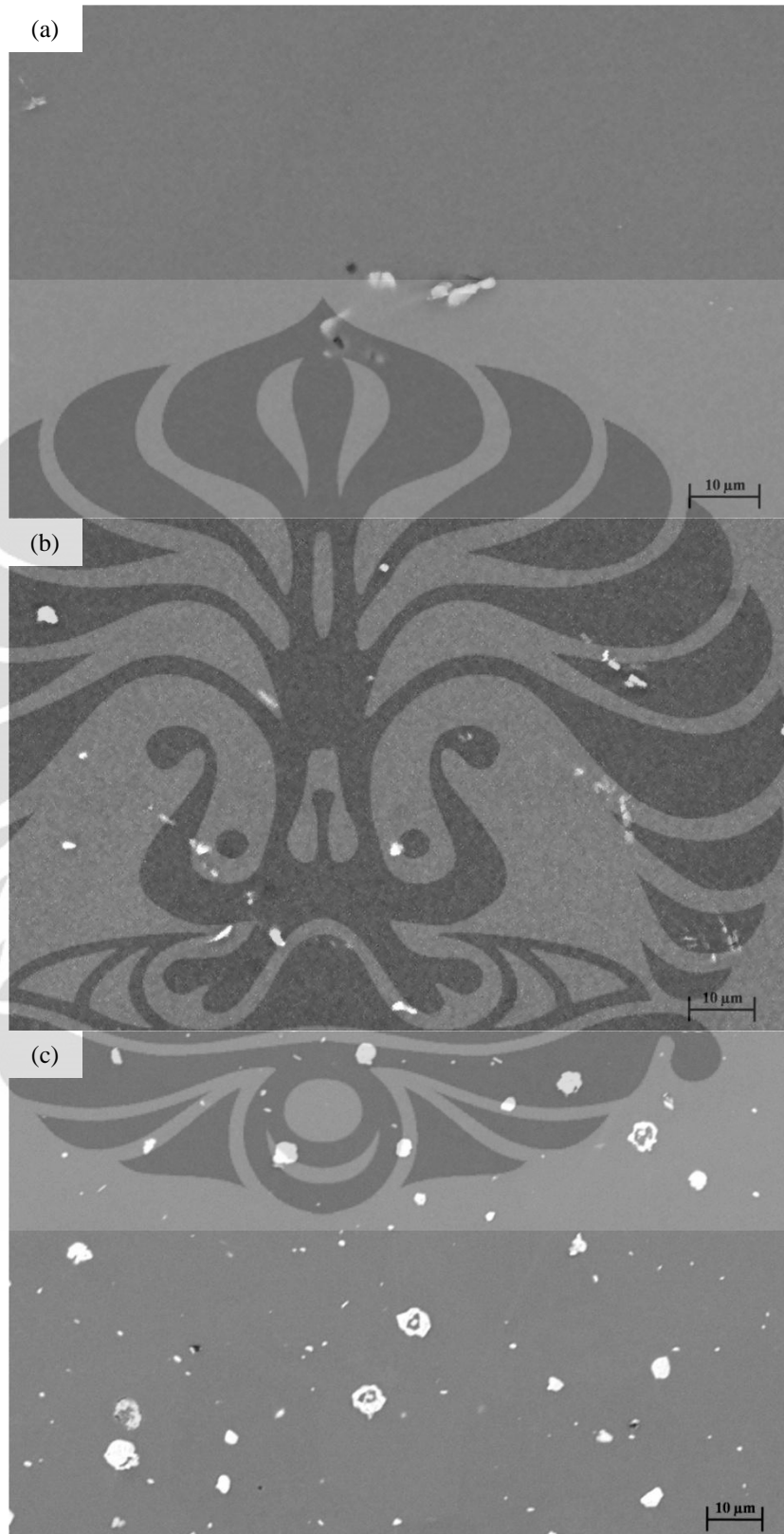
Penambahan Cu dapat merubah densitas dari Guinier-Preston-zones (GPZs) dan bentuk serta komposisi partikel<sup>[9]</sup>. Pada paduan Al-Zn-Mg GPZs berbentuk *spherical*, sedangkan paduan yang sama dengan kandungan Cu 0.5 at. % ditemukan bentuk *spherical* dan *ellipsoidal* GPZs. Tembaga juga memberikan 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 Al<sub>2</sub>CuMg terbentuk selama perlakuan panas<sup>[10]</sup>.

Pengamatan mengenai pengaruh Cu dalam paduan Al-Zn-Mg dilakukan pada variabel Zn dan Mg yang tetap, yaitu 1.7 at. %. Observasi mikrostruktur dengan menggunakan mikroskop optik pada struktur *as cast* pada butir 4.1.2 sebelumnya juga dapat memberikan gambaran mengenai pengaruh Cu dalam paduan Al-Zn-Mg. Pengamatan pada paduan Al-1.7Zn-1.7Mg-0.4Cu, Al-1.7Zn-1.7Mg-1.0Cu dan Al-1.7Zn-1.7Mg-1.6Cu (at. %) ini menunjukkan konsentrasi bintik-bintik coklat kehitaman yang bertambah dengan peningkatan kadar Cu (bintik coklat kehitaman pada 1.6 at. % Cu > 1.0 at. % Cu > 0.4 at. % Cu). Peningkatan konsentrasi bintik coklat kehitaman seiring dengan peningkatan kadar Cu dalam paduan mengindikasikan hal ini berhubungan dengan peningkatan presipitat yang terbentuk karena elemen Cu.

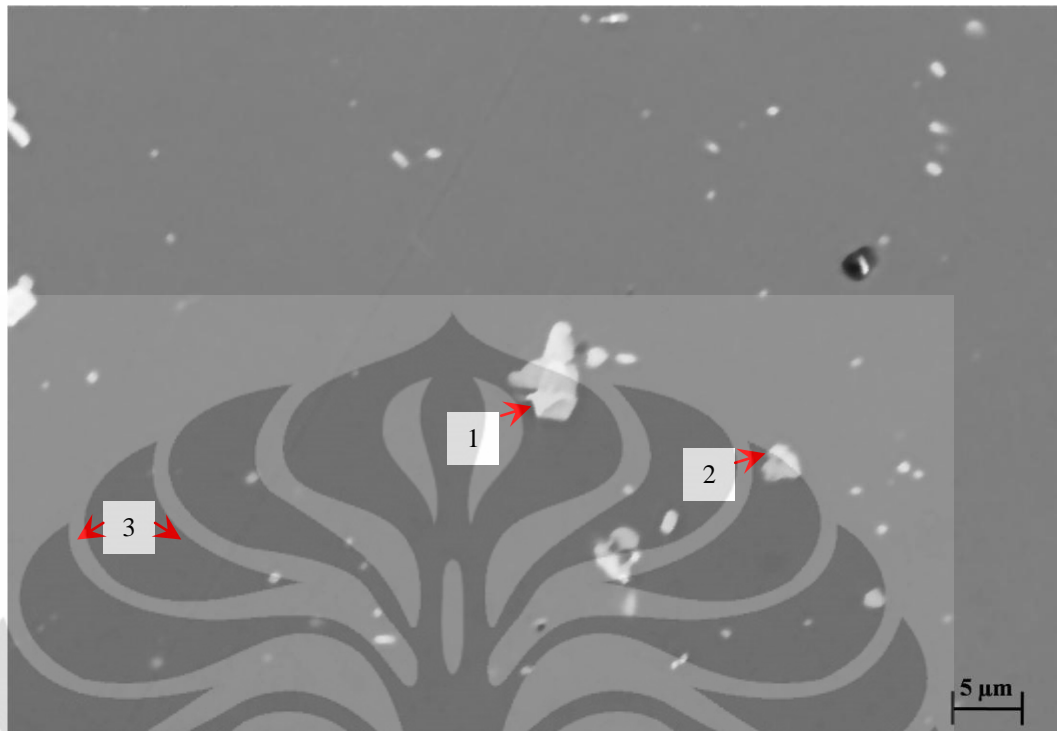
Pengaruh Cu pada bab ini diamati dengan menggunakan SEM seperti ditunjukkan oleh Gambar 6.4 (a), (b) dan (c). Pengamatan dilakukan pada paduan dengan kadar Zn dan Mg yang tetap, yaitu Al-1.7Zn-1.7Mg-0.4Cu, Al-1.7Zn-1.7Mg-0.7Cu dan Al-1.7Zn-1.7Mg-1.6Cu (at. %). Analisis kuantitatif fasa dengan metode planimetri untuk mengobservasi pengaruh peningkatan kadar Cu dalam paduan Al-Zn-Mg. Gambar menunjukkan noda putih yang merupakan fasa intermetalik oleh elemen Cu, meningkat dengan penambahan kadar Cu dalam paduan. Analisis kuantitatif perhitungan fraksi volume fasa dilakukan dengan menggunakan *square grid* pada ASTM E 562 - 02 (lihat Gambar 6.3). Pengamatan dengan menggunakan EDS (lihat Gambar 6.5 dan Tabel 6.1) pada paduan Al-1.7Zn-1.7Mg-1.6Cu (at. %) menunjukkan bahwa noda putih yang terang merupakan fasa  $Al_7Cu_2Fe$  sedangkan noda putih yang berwarna abu-abu diperkirakan adalah fasa  $CuMgAl_2$  atau  $CuAl_2$ .



**Gambar 6.3.** *Square grid* standar pada ASTM E 562 - 02<sup>[78]</sup>.



**Gambar 6.4.** 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.



**Gambar 6.5.** 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 6.1.** Rangkuman hasil EDS paduan Al-1.7Zn-1.7Mg-1.6Cu (at. %) 1 menit *ageing* pada temperatur 120 °C berdasarkan foto BSE (Gambar 5.6 (c))

No	Rata-rata unsur (at. %)						Fasa yang mungkin*)
	Zn	Mg	Cu	Fe	Si	Al	
1	--	--	15.07	2.36	--	78.15	Al <sub>7</sub> Cu <sub>2</sub> Fe
2	--	1.36	2.70	--	--	91.66	CuMgAl <sub>2</sub> atau CuAl <sub>2</sub>
3	1.16	--	--	--	--	96.24	Al (matriks)

\*) Prediksi fasa didasarkan pada data fasa yang mungkin muncul dalam paduan Al-Zn-Mg<sup>[39]</sup> seperti ditunjukkan pada Tabel 2.7.

Analisis kuantitatif perhitungan fraksi volume fasa yang dilakukan dengan menggunakan *square grid* pada ASTM E 562 - 02 memperoleh hasil seperti ditunjukkan pada Tabel 6.2. Terlihat 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 %.

**Tabel 6.2.** 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 = $(14/64) \times 100\% = 21.88\%$



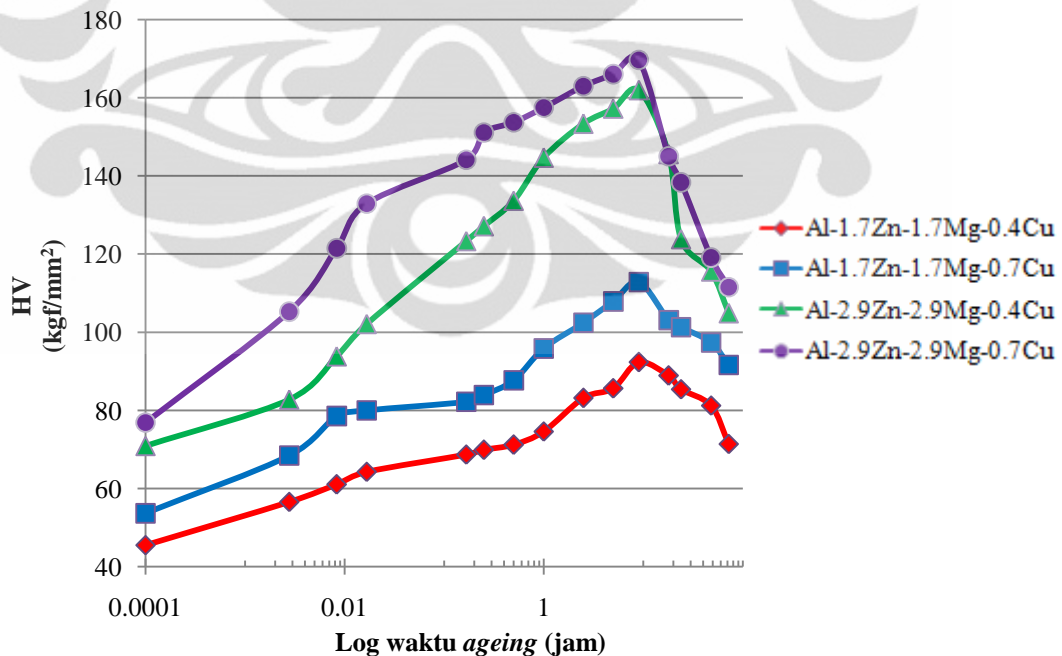


## BAB 7

### ANALISIS FENOMENA RAPID HARDENING DALAM PADUAN AL-Zn-Mg-Cu SELAMA AGEING PADA TEMPERATUR 190 °C

#### 7.1 Analisis Kurva Age Hardening

Fenomena *rapid hardening* paduan aluminium menyebabkan adanya peningkatan kekerasan secara signifikan yang terjadi pada saat-saat awal perlakuan panas. Fenomena ini dipercaya terjadi karena adanya *cluster* paduan aluminium yang terbentuk di awal *ageing* setelah *solution treatment* dan *quenching*. Pengerasan yang signifikan dapat dilihat dari kemiringan peningkatan kekerasan setelah *ageing* (grafik kekerasan v.s waktu *ageing*) pada tahap-tahap awal. Dalam penelitian paduan Al-Zn-Mg-Cu ini, fenomena *rapid hardening* ditemukan selama proses *ageing* pada temperatur 190 °C. Hanya ada empat paduan yang dilakukan proses *ageing* pada temperatur ini, yaitu Al-1.7Zn-1.7Mg- (0.4 dan 0.7) Cu (at. %) serta Al-2.9Zn-2.9Mg- (0.4 dan 0.7) Cu (at. %). Gabungan kurva *age hardening* keempat paduan ini dapat dilihat pada Gambar 7.1.

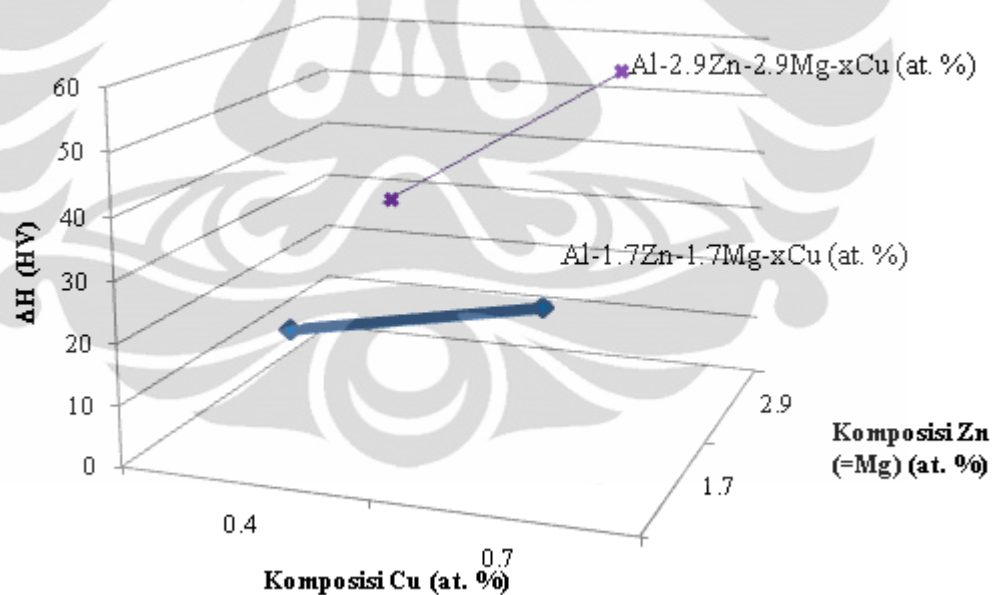


Gambar 7.1. Respons pengerasan pada paduan Al-1.7Zn-1.7Mg- (0.4 dan 0.7) Cu serta paduan Al-2.9Zn-2.9Mg- (0.4 dan 0.7) Cu (at. %) selama *ageing* pada temperatur 190 °C.

Respons *ageing* yang berbeda pada keempat grafik di atas disebabkan oleh perbedaan unsur yang menyusun setiap paduan. Untuk mengamati lebih jelas mengenai pengaruh elemen penyusun paduan Al-Zn-Mg-Cu terhadap fenomena *rapid hardening*, dilakukan pengamatan pada grafik 3 dimensi pengaruh elemen v.s  $\Delta H$  seperti ditunjukkan pada Gambar 7.2. Sajian data penyusun kurva 3 dimensi ditunjukkan oleh Tabel 7.1 dimana  $\Delta H$  diambil dari nilai kekerasan selama 1 menit *ageing* pada temperatur 190 °C dikurangi dengan nilai kekerasan *as quench*-nya.

**Tabel 7.1.** Selisih nilai kekerasan setelah proses *ageing* selama 1 menit pada temperatur 190 °C dengan nilai kekerasan *as quench* ( $\Delta H$ ) untuk paduan Al-1.7Zn-1.7Mg- (0.4 dan 0.7) Cu serta paduan Al-2.9Zn-2.9Mg- (0.4 dan 0.7) Cu (at. %). Komposisi Zn (= Mg) dan Cu disajikan dalam at. %.

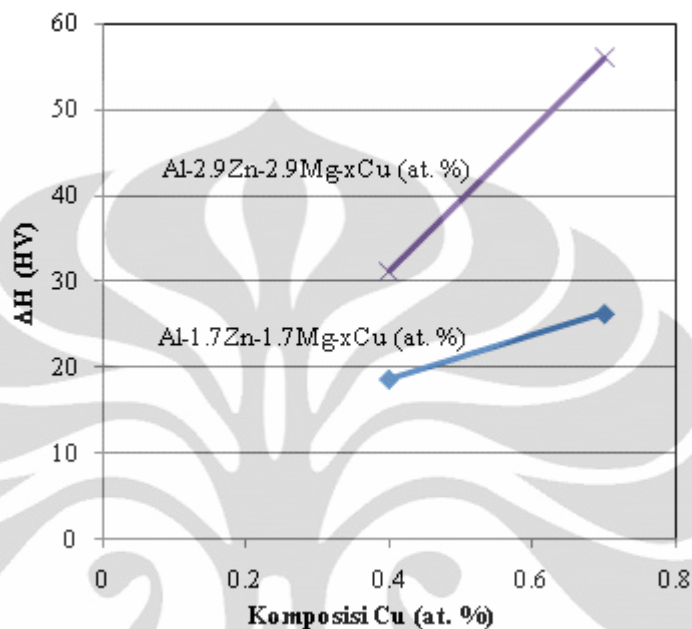
Zn (=Mg)	Cu	
	0.4	0.7
1.7	18.73	26.36
2.1	31.2	55.99



**Gambar 7.2.** Kurva 3 dimensi dari pengaruh Zn dan Mg terhadap respons *rapid hardening* paduan Al-1.7Zn-1.7Mg- (0.4 dan 0.7) Cu serta paduan Al-2.9Zn-2.9Mg- (0.4 dan 0.7) Cu (at. %) selama *ageing* pada temperatur 190 °C.

Gambar 7.2 menunjukkan bahwa dengan penambahan kadar Zn dan Mg sebesar 1.2 at. % dapat meningkatkan respons *rapid hardening* cukup signifikan. Paduan dengan komposisi Al-2.9Zn-2.9Mg-0.7Cu (at. %) dapat mencapai  $\Delta H$  sebesar 55.99 HV atau nilai kekerasannya menjadi 132.88 HV hanya dengan 1

menit *ageing* pada temperatur 190 °C. Untuk mengamati lebih jelas mengenai pengaruh Cu terhadap respon *rapid hardening*, data pada Tabel 7.1 direproduksi untuk pembuatan kurva *scatter* seperti ditunjukkan pada Gambar 7.3.

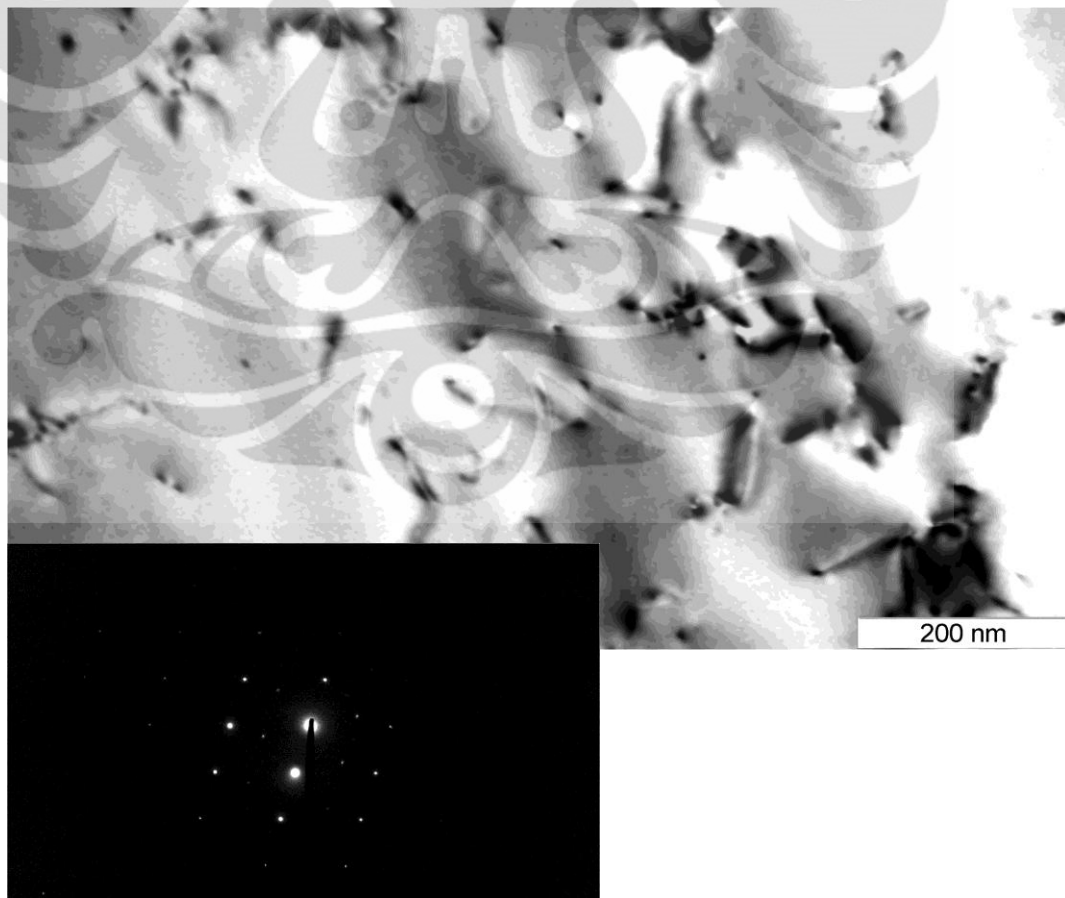


**Gambar 7.3.** Kurva *scatter* untuk melihat pengaruh Cu terhadap respons *rapid hardening* paduan Al-1.7Zn-1.7Mg- (0.4 dan 0.7) Cu serta paduan Al-2.9Zn-2.9Mg- (0.4 dan 0.7) Cu (at. %) selama *ageing* pada temperatur 190 °C.

Seperti terlihat pada Gambar 7.3, pengaruh Cu terhadap peningkatan  $\Delta H$  1 menit *ageing*, terjadi jauh lebih besar pada kandungan Zn dan Mg yang lebih tinggi (2.9 at. %) dibandingkan dengan peningkatan  $\Delta H$  pada kadar Zn yang lebih rendah (1.7 at. %). Peningkatan  $\Delta H$  selama 1 menit *ageing* paduan dengan penambahan 0.3 at. % Cu pada kadar Zn dan Mg sebesar 1.7 at. % adalah 40.79 %. Dengan penambahan kadar Cu yang sama (0.3 at. %), peningkatan  $\Delta H$  pada kadar Zn dan Mg 2.9 at. % mencapai 79.45 %. Hal ini dikarenakan dengan penambahan sedikit Cu dapat mengubah mikrostruktur dan dekomposisi kinetik dari paduan Al-Zn-Mg-Cu. Dimana melalui penambahan elemen Cu < 1 at. % dapat secara dramatis menurunkan waktu inkubasi presipitat dan menyebabkan reaksi *rapid hardening*<sup>[18]</sup>.

## 7.2 Analisis Struktur Nano pada Fenomena *Rapid Hardening* Paduan Al-Zn-Mg-Cu

Pengamatan dengan menggunakan TEM pada arah standar  $\langle 110 \rangle_\alpha$  dilakukan terhadap paduan Al-1.7Zn-1.7Mg-0.4Cu (at. %) selama proses *ageing* pada temperatur 190 °C seperti ditunjukkan Gambar 7.4. Terlihat adanya struktur *cluster* nano yang sedikit lebih halus dibandingkan dengan *cluster* paduan yang sama selama 1 menit *ageing* pada 120 °C (bandingkan dengan Gambar 5.9 (a) pada butir 5.2.3). Struktur *cluster* nano ini yang menyebabkan terjadinya peningkatan nilai kekerasan yang signifikan pada awal proses *ageing*. Nilai kekerasan paduan Al-1.7Zn-1.7Mg-0.4Cu (at. %) selama 1 menit *ageing* pada temperatur 120 °C dan 190 °C berturut-turut adalah 53.4 HV dan 64.24 HV. Namun demikian mekanisme elemen Zn, Mg dan Cu dapat meningkatkan kinetik dan kekerasan pada kondisi awal *ageing* belum dapat didefinisikan secara pasti. *Cluster hardening* disebut sebagai penyebab dari peningkatan sifat yang terjadi.



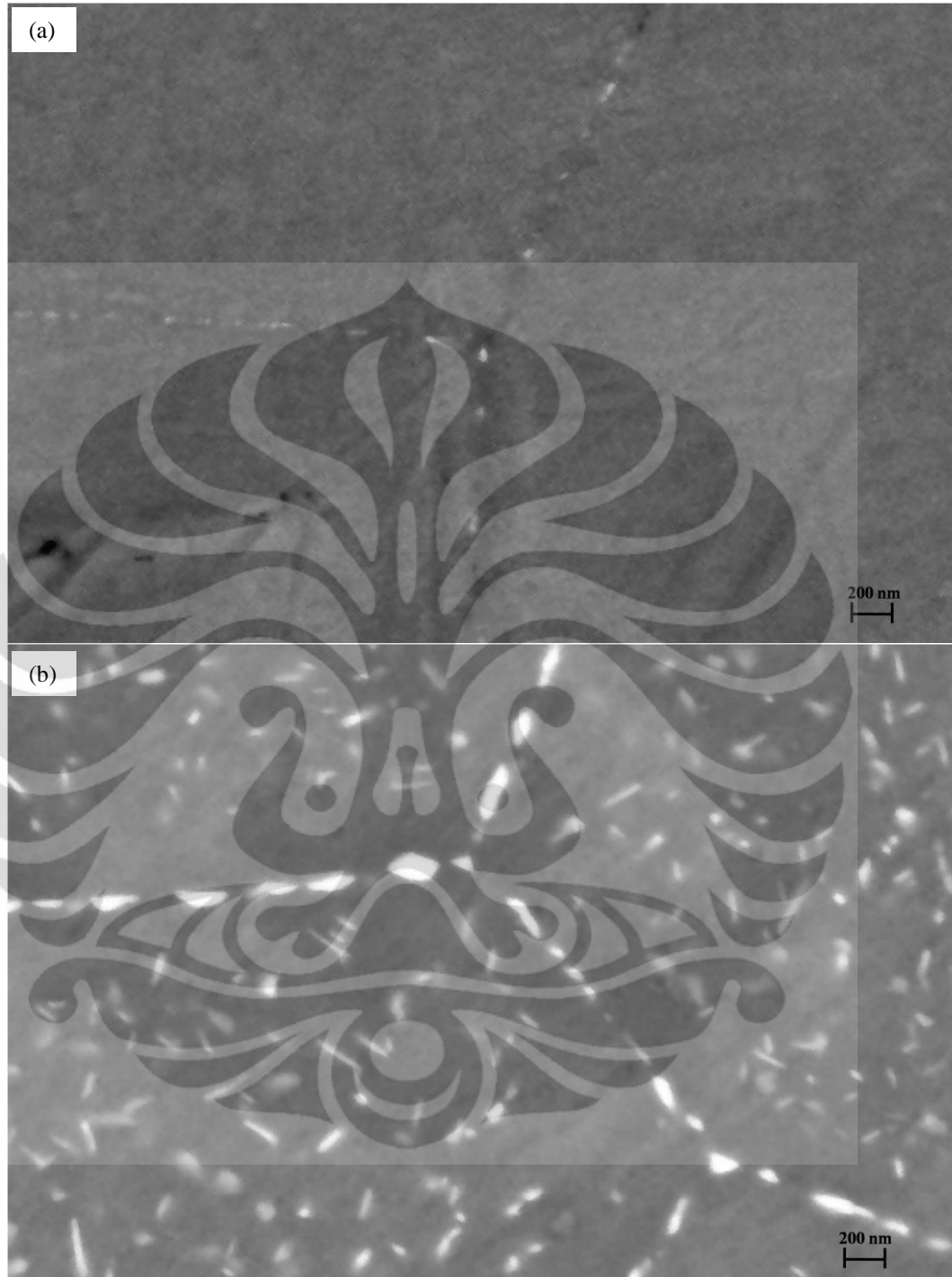
**Gambar 7.4.** Bright field transmission electron micrograph selected area diffraction paduan Al-1.7Zn-1.7Mg-0.4Cu (at. %) selama *ageing* pada temperatur 190 °C dengan arah standar  $\langle 110 \rangle_\alpha$ .

### 7.3 Fenomena *Precipitate Free Zone* pada Paduan Al-Zn-Mg-Cu

*Precipitate free zone* (PFZ) di dekat batas butir dapat mempengaruhi *ductility* dan kekuatan material. Peningkatan kekuatan dan *ductility* pada dasarnya dipengaruhi oleh pengurangan area PFZ<sup>[6]</sup>. Pengamatan PFZ paduan Al-Zn-Mg-Cu dalam penelitian ini dilakukan dengan menggunakan HR-SEM Zeiss Ultra. PFZ ditemukan pada paduan Al-1.7Zn-1.7Mg-0.4Cu (at. %) dalam kondisi *over aged* yaitu setelah mengalami proses *ageing* selama 1 minggu pada temperatur 120 °C dan 3 hari pada temperatur 190 °C seperti ditunjukkan pada Gambar 7.5 (a) dan (b).

Melalui hasil pengamatan pada Gambar 7.5 terbukti bahwa temperatur *ageing* yang rendah efektif untuk pengurangan lebar dari PFZ. PFZ yang sempit yang ditunjukkan oleh Gambar 7.5 (a) menyebabkan pengamatan fenomena ini kurang terlihat jelas dalam paduan Al-1.7Zn-1.7Mg-0.4Cu (at. %) selama 1 minggu *ageing* pada temperatur 120 °C. Sebaliknya, pada temperatur *ageing* yang lebih tinggi PFZ semakin terlihat jelas, dimana sebagai konsekuensinya akan terjadi pengurangan *ductility* dan kekuatan material. Lebar PFZ paduan Al-1.7Zn-1.7Mg-0.4Cu (at. %) selama 1 minggu *ageing* pada temperatur 120 °C adalah  $\pm 75$  nm dan meningkat menjadi  $\pm 200$  nm setelah *ageing* selama 3 hari pada temperatur 190 °C. Mekanisme detail dari pengurangan lebar PFZ atau hilangnya PFZ belum dapat dijelaskan secara pasti. Profil distribusi dari atom *solute* dan *quench* yang memerangkap *vacancies* diasumsikan dapat mempengaruhi nukleasi dan pertumbuhan dari presipitat. *Nanocluster* dari elemen *microalloying* diasumsikan juga berguna untuk mengontrol PFZ dan batas butir presipitat.





**Gambar 7.5.** Foto *Back Scattered Electron* (BSE) paduan Al-1.7Zn-1.7Mg-0.4Cu (at. %) selama *ageing* (a) 1 minggu pada temperatur 120 °C, (b) 3 hari pada temperatur 190 °C yang menunjukkan adanya PFZ pada batas butir. Foto diambil pada perbesaran 60000X.

## BAB 8

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 8.1 Kesimpulan

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

1. Parameter proses pengecoran induksi vakum terbaik untuk pengecoran paduan Al-Zn-Mg-Cu dari logam murninya adalah sebagai berikut:
  - a. Kontrol terhadap temperatur proses selama pengecoran sangat penting dilakukan untuk meminimalkan kadar Zn yang hilang dan memastikan Cu berdifusi sempurna dalam paduan, sehingga temperatur maksimum dijaga agar tidak melebihi 750 °C dan temperatur *holding* yang aman dilakukan adalah pada 715-720 °C dengan waktu tahan 8-11 menit.
  - b. Permasalahan Zn dan Mg yang hilang dapat diatasi melalui penambahan massa sebagai kompensasi dengan skenario sebagai berikut:
    - i. Penambahan Mg = 5 % × massa awal Mg untuk semua paduan pada pengecoran dari logam murninya.
    - ii. Penambahan Zn = 5 % (atau 7-8 %) × massa awal Zn, tergantung pada lamanya waktu tahan pengecoran (sehingga berhubungan dengan jumlah kadar Cu yang ingin dipadukan, dimana pada kadar Cu yang tinggi juga dibutuhkan kompensasi penambahan Zn yang lebih besar).
2. Parameter pengerolan yang sesuai untuk paduan Al-Zn-Mg-Cu guna menghilangkan struktur cor adalah:
  - a. Paduan dengan kadar Zn dan Cu yang tinggi, yaitu Al-2.5Zn-2.5Mg-1.6Cu, Al-2.9Zn-2.9Mg-1.3Cu dan Al-2.9Zn-2.9Mg-1.6Cu (at. %) lebih sensitif terhadap retak.
  - b. Kisaran temperatur proses pengerolan 290-430 °C disesuaikan dengan komposisi paduan. Semakin tinggi komposisi unsur paduan

maka temperatur proses pengerolannya akan semakin rendah guna menghindari *Zn cracking* dan *thermal shock*.

3. Respons pengerasan paduan Al-Zn-Mg-Cu selama *ageing* pada temperatur 120 °C adalah:

- a. Semakin tinggi kadar Mg dan Zn dalam paduan, maka kekerasan puncak akan semakin meningkat, dikarenakan bertambahnya presipitat halus  $Mg_3Zn_3Al_2$ ,  $MgZn_2$  ( $\eta$ ) berbentuk *spherical* yang tersebar cukup merata di dalam matriks. Nano presipitat ini ditemukan melalui pengamatan HRSEM dan TEM pada spesimen Al-1.7Zn-1.7Mg-0.4Cu (at. %) setelah *ageing* selama 24 jam pada temperatur 120 °C.
- b. 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, *vacancy* yang disediakan Cu dapat menyediakan tempat untuk pembentukan presipitat oleh Zn dan Mg. Jumlah *vacancy* dengan sendirinya lebih banyak terbentuk pada kadar Zn dan Mg yang tinggi. Sehingga pengaruh Cu tidak akan memberikan respons yang signifikan lagi seperti mekanisme pengerasan pada kadar Zn dan Mg yang rendah.
- c. 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 quench*.
- d. Noda putih yang merupakan fasa intermetalik oleh elemen Cu (diperkirakan adalah  $CuMgAl_2$  atau  $CuAl_2$ , jika dengan Fe dapat membentuk  $Al_7Cu_2Fe$ ), akan semakin meningkat dengan penambahan kadar Cu dalam paduan.
- e. Temperatur *ageing* yang rendah efektif untuk pengurangan lebar dari *precipitate free zone* (PFZ) yang berdampak dapat meningkatkan *ductility* dan kekuatan paduan. Lebar PFZ paduan

Al-1.7Zn-1.7Mg-0.4Cu (at. %) selama 1 minggu *ageing* pada temperatur 120 °C berukuran  $\pm 75$  nm dan ditemukan meningkat menjadi  $\pm 200$  nm setelah *ageing* selama 3 hari pada temperatur 190 °C.

4. Fenomena *rapid hardening* yang diamati pada paduan Al-1.7Zn-1.7Mg-0.4Cu, Al-1.7Zn-1.7Mg-0.7Cu, Al-2.9Zn-2.9Mg-0.4Cu dan Al-2.9Zn-2.9Mg-0.7Cu (at. %) memberikan informasi sebagai berikut:
  - a. *Rapid hardening* dalam paduan Al-Zn-Mg-Cu hanya dijumpai selama *ageing* pada temperatur 190 °C dan tidak terlihat selama *ageing* pada temperatur 120 °C.
  - b. Peningkatan kadar Zn dan Mg dalam paduan Al-Zn-Mg-Cu dapat meningkatkan respons *rapid hardening*. Dimana pada paduan dengan kadar Zn tertinggi (Al-2.9Zn-2.9Mg-0.7Cu (at. %)) mencapai nilai kekerasan 132.88 HV (atau  $\Delta H$  dari *as quench* = 55.99 HV) selama 1 menit *ageing* pada temperatur 190 °C.
  - c. Pengaruh Cu dalam fenomena *rapid hardening* paduan Al-Zn-Mg-Cu lebih signifikan terjadi pada paduan dengan kadar Zn dan Mg yang tinggi. Peningkatan  $\Delta H$  selama 1 menit *ageing* paduan dengan penambahan 0.3 at. % Cu pada kadar Zn dan Mg sebesar 1.7 at. % adalah 40.79 %. Dengan penambahan kadar Cu yang sama (0.3 at. %), peningkatan  $\Delta H$  pada kadar Zn dan Mg 2.9 at. % mencapai 79.45 %.
  - d. Respons *rapid hardening* terbaik ditunjukkan oleh paduan Al-2.9Zn-2.9Mg-0.7Cu (at. %) yang mencapai  $\Delta H$  sebesar 132.88 HV selama 1 menit *ageing* pada temperatur 190 °C.

## 8.2 Saran

Penelitian lebih lanjut mengenai fenomena *clustering* pada paduan Al-Zn-Mg-Cu masih perlu dilakukan untuk mendapatkan pemahaman yang lebih baik mengenai evolusi *cluster* menjadi presipitat. Distribusi elemen secara detail hanya dapat diamati dengan *atom probe* dan pemodelannya. Penelitian lebih lanjut juga berguna untuk memastikan komposisi terbaik paduan Al-Zn-Mg-Cu yang banyak digunakan pada aplikasi penerbangan.

## DAFTAR ACUAN

1. Wills, B.A., & Napier-Munn, T.J., *Mineral Processing Technology*. 7 ed. 2006: Elsevier Science & Technology Books.
2. Warner, T., *Recently-developed aluminium solutions for aerospace applications*. 2006. p. 1271-1278.
3. Zolotarevsky, V.S., A, Nikolai., & Glazoff, Michael.V., *Casting Aluminium Alloy*. 2007, Moscow: Elsevier.
4. Totten, G.E., MacKenzie, D.Scott., ed. *Handbook of Aluminum: Physical Metallurgy and Processes*. Vol. 1. 2003, Marcel Dekker, Inc.: New York.
5. Sha, G., et al., *Segregation of solute elements at grain boundaries in an ultrafine grained Al-Zn-Mg-Cu alloy*. *Ultramicroscopy*. **In Press, Corrected Proof**.
6. Hosono, H., Mishima Y., Takezoe, H., & MacKenzie, K.J.D., ed. *Nanomaterials : From Research to Applications*. 2006, Elsevier Ltd.: Oxford.
7. 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.
8. Sarkar, B., M. Marek, and E. Starke, *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*, 1981. **12**(11): p. 1939-1943.
9. Chinh, N.Q., et al., *The effect of Cu on mechanical and precipitation properties of Al-Zn-Mg alloys*. *Journal of Alloys and Compounds*, 2004. **378**(1-2): p. 52-60.
10. 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.
11. Kaufman, J.G., & Rooy, Elwin.L., *Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes, and Applications*. 2004, United States: ASM International.
12. Reinhardt Schuhmann, J., *Metallurgical Engineering: Engineering Principles*. Vol. 1. 1952, London: Addison-Wesley Publishing Company, INC.
13. Suharno, B., *Slide Kuliah: Pengecoran Logam*. 2007, Departemen Metalurgi dan Material FTUI: Depok.
14. 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.
15. Fan, X., et al., *The microstructural evolution of an Al-Zn-Mg-Cu alloy during homogenization*. *Materials Letters*, 2006. **60**(12): p. 1475-1479.
16. Salamci, E., *Ageing Behaviour of Spray Cast Al-Zn-Mg-Cu Alloys*. *Turk J Engin Environ Sci*, 2001. **25**: p. 681-686.
17. Sha, G., & Cerezo, A., *Early-stage Precipitation in Al-Zn-Mg-Cu Alloy (7050)*. *Acta Materialia*, 2004. **52**: p. 4503-4516.
18. Liddicoat, P.V., *Evolution of Nanostructural Architecture in 7000 Series Aluminium Alloys during Strengthening by Age-Hardening and Severe*



- Plastic Deformation*, in *Australian Key Centre for Microscopy & Microanalysis Electron Microscopy Unit*. 2009, The University of Sydney: Sydney.
19. Berg, L.K., et al., *GP-zones in Al-Zn-Mg alloys and their role in artificial aging*. *Acta Materialia*, 2001. **49**(17): p. 3443-3451.
  20. Lacom, W., C.Y. Zahra, and A.M. Zahra, *Discontinuous precipitation in Al-50 WT% Zn alloys*. *Scripta Metallurgica*, 1989. **23**(12): p. 2001-2005.
  21. Lacom, W., Degischer, H.P., Zahra, A.M., Zahra, C.Y. , *On Calorimetric and Electron Microscopic Studies of Al-Zn-Mg Alloys*. *Scripta Metallurgica*, 1980. **14**: p. 253-254.
  22. Charai, A., et al., *Metastable phases and clusters in an Al-6 % Zn alloy*. *Scripta Metallurgica*, 1984. **18**(8): p. 759-762.
  23. Gjønnnes, J. and C.J. Simensen, *An electron microscope investigation of the microstructure in an aluminium-zinc-magnesium alloy*. *Acta Metallurgica*, 1970. **18**(8): p. 881-890.
  24. Groma, G. and Z. Szentirmay, *The change of zone composition in AlZnMg alloys during ageing*. *Scripta Metallurgica*, 1978. **12**(11): p. 991-992.
  25. Marlaud, T., et al., *Influence of alloy composition and heat treatment on precipitate composition in Al-Zn-Mg-Cu alloys*. *Acta Materialia*, 2010. **58**(1): p. 248-260.
  26. Maloney, S.K.H., K.; Polmear, I.J.; dan Ringer, S.P., *Chemistry of precipitates in an aged Al-2.1Zn-1.7Mg at.% alloy*. *Scripta Materialia*, 1999. **41**(10): p. 1031-1038.
  27. Agrawal, B.K., *Introduction to Engineering Materials*. 1994, New Delhi: McGraw Hill.
  28. Callister, W.D., *Materials Science and Engineering: An Introduction* 7th ed. 2007, New York: John Wiley & Sons, Inc.
  29. *JIS Handbook : Non Ferrous Metals & Metallurgy*. 1977, Tokyo: Japanese Standard Association.
  30. Budinski, K.G., & Budinski, Michael K, *Engineering Materials Properties and Selection*. 8th ed. 2005, USA: Pearson Prentice Hall.
  31. Davis, J.R., *Alloying: Understanding The Basic*. 2001, Ohio: ASM International.
  32. ASM-International, *ASM Handbook: Casting*. Vol. 15. 1988, Ohio: American Society for Metals.
  33. ASM-International, *ASM Specialty Handbook : Aluminum and Aluminum Alloys*. 1993, Ohio: American Society for Metals.
  34. Ramachandran, T.R., Sharma T.R., & Balasubramanian K., *Grain refinement in light alloy*. 2008.
  35. *Classification of Alluminium Alloys*. [cited 2011 March 15th]; Available from: <http://www.substech.com>.
  36. Kaufman, J.G., *Introduction to Aluminum Alloys and Tempers*. 2000, USA: ASM International.
  37. Donald R. Askeland, P.P.P., *The Science and Engineering of Materials*. 2006, USA: Thomson Canada Limited.
  38. ASM-International, *ASM Handbook Vol. 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*. Vol. 2. 1990, Ohio: American Society for Metals.

39. Mondolfo, L.F., *Aluminium Alloys : Structure and Properties*. 1976, Boston: Butterworth & Co Ltd.
40. Knovel, *Aluminum Alloy Database*, in 2004; 2009. 2009.
41. Hatch, J.E., *Aluminium : Properties and Physical Metallurgy*. 1984, Ohio: American Society for Metals.
42. Yasunori Fujikawa, K.N., Toshio Sakurai, ed. *Frontiers in Materials Research*. ed. M.H. Yoshiyuki Kawazoe, Akihisa Inoue, Norio Kobayashi, Toshio Sakurai. 2008, Springer: Berlin.
43. Sofyan, B.T., *Pengantar Material Teknik*. 2009, Depok: Departemen Metalurgi dan Material FTUI.
44. Degarmo, E.P., Black, J T., & Kohser, Ronald A., *Materials and Processes in Manufacturing*. 9th ed. 2003: Wiley.
45. *Instruction Manual for Vacuum Tilting Casting Machine VTC200*, INDUTHERM, Editor: Germany.
46. Jain, P.L., *Foundry Technology*. 1994, New Delhi: Tata McGraw Hill.
47. Beddoes, J., & Bibby, M.J., *Principles of Metal Manufacturing Processes*. 1999, Elsevier Ltd.
48. Easterling, K.E., & Porter, D.A. , *Phase Transformations in Metals and Alloys*. 2 ed. 1992, London: Chapman & Hall.
49. Yu, K.-O., *Modeling for Casting and Solidification Processing*. 2002: CRC Press.
50. *Aluminum and Aluminum Alloys Casting Problems*. 2011 [cited 2011 March, 18]; Available from: <http://www.key-to-nonferrous.com>.
51. Tian Rong-zhang, W.Z.-t., *Handbook of Aluminium Alloys and Its Forming*. 2004, Changsha: Central South University Press.
52. Saptono, R. and *Diktat Praktikum Teknologi Pembentukan Logam 2010*. 2010, Depok: Departemen Metalurgi dan Material FTUI.
53. Hosford, W.F., & Caddel, Robert M., *Metal Forming Mechanics and Metallurgy*. 1983: Prentice Hall.
54. Saptono, R., *Kuliah Pertama Pembentukan Logam*. 2005, Depok: Departemen Metalurgi dan Material FTUI.
55. Kalpakjian, S., & Schmid, Steven R., *Manufacturing Engineering and Technology, 4th ed*. 2001, New Jersey: Prentice-Hall Int.
56. Krzyzanowski, M., & Beynon, John H., *Oxide Behaviour in Hot Rolling in Metal Forming Science and Practice*, J.G. Lenard, Editor. 2002, Elsevier Science Ltd.
57. E. Di Russo, M.C., M. Buratti, F. Gatto, *A New Thermo-Mechanical Procedure for Improving the Ductility and Toughness of Al-Zn-Mg-Cu Alloys in the Transverse directions*. *Materials Science and Engineering*, 1974. **14**: p. 23-36.
58. Saptono, R., *Rolling: An Introductory Lecture*. 2009, Departemen Metalurgi dan Material FTUI: Depok.
59. M. Ashby, H.S., & D. Cebon, *Materials Engineering, Science, Processing and Design*. 2007, Oxford: Elsevier Ltd.
60. ASM-International, *ASM Handbook Vol. 4: Heat Treating*. 1991, Ohio: American Society for Metals.
61. Singh, V., *Physical Metallurgy*. 2002, Standard publisher Distributors: Delhi.

62. Totten, G.E., Webster, Glenn M., & Bates, Charles E., *Quenching*, in *Handbook of Aluminum*. 2003, Marcel-Dekkar, Inc: New York, NY. p. 881-970.
63. Nowill, C., *Investigation of the Quench and Heating Rate Sensitivities of Selected 7000 Series Aluminum Alloys*, in *Materials Science and Engineering*. 2007, Worcester Polytechnic Institute: Worcester, MA.
64. Alvarez, O., Gonzales, C., Aramburo, G., Herrera, R., Juarez-Islas, J.A., *Characterization and Prediction of Microstructure in Al-Zn-Mg Alloys*. *Materials Science and Engineering*, 2005. **A 402**: p. 320-324.
65. Djaprie, S., *Terjemahan: Ilmu dan Teknologi Bahan*. 1991, Jakarta: Erlangga.
66. Ringer, S.P., & Hono, K., *Microstructural Evolution and Age Hardening in Aluminium Alloys: Atom Probe Field-Ion Microscopy and Transmission Electron Microscopy Studies*. *Materials Characterization*, 2000. **44**: p. 101-131.
67. Guangchun, Q., *The Precipitation Process in Microalloyed Al-Cu-Mg-(Ge,Ag) Alloys*, in *Department of Materials Engineering*. 1997, Monash University: Victoria.
68. Altenpohl, D., *Aluminium Viewed from Within : An Introduction into the Metallurgy of Aluminium Fabrication 1st ed.* 1st ed. 1982, Düsseldorf: Aluminium-Verlag.
69. ASTM-International, *Standard Practice for Sampling Nonferrous Metals and Alloys in Cast Form for Determination of Chemical Composition*. 2001, ASTM-International: United States.
70. ASTM-International, *Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials*. 1997, ASTM International: United States.
71. ASM-International, *ASM Handbook Vol. 9 Metallography and Microstructures*, ed. G.F.V. Voort. Vol. 9. 2004, Ohio: American Society for Metals.
72. Williams, D., *Transmission Electron Microscopy : Basic*. 1996, New York: Plenum Publishing Corp.
73. Aye, S.W.H., Lwin Kay Thi., & Oo, Waing Waing Kay Khine, *The Effect of Ageing Treatment of Aluminium Alloys for Fuselage Structure-Light Aircraft*. World Academy of Science, Engineering and Technology, 2008. **46**: p. 696-699.
74. Nayan, N., Murty, S. Y. S. Narayana., Gotvind., Mittal, M. C., & Sinha, P. P., *Optimization of Homogenizing Mode for Aluminum Alloy AA7075 using Calorimetric and Microstructural Studies*. *Metal Science and Heat Treatment* 2009. **51**: p. 14-21.
75. ASTM-International, *Standard Test Method for Determining Average Grain Size*. 1996, ASTM International: United States.
76. Ariati, M., & N. P., Wahyuaji, *Slide Kuliah: Metalografi Kuantitatif*. 2008, Departemen Metalurgi dan Material FTUI: Depok.
77. Maitland, T., & Sitzman, Scott., *Electron Backscatter Diffraction (EBSD) Technique and Materials Characterization Examples*, in *Scanning Microscopy for Nanotechnology Techniques and Applications*, W. Zhou, & Wang, Z.L., Editor. 2007, Springer.

## LAMPIRAN 1. SERTIFIKAT *INGOT* ALUMINIUM

### **RIO TINTO**

#### ALUMINIUM

Delivery Note No.: 800056931

7/10/2009

**Company Name:** RIO TINTO ALUMINIUM (BELL BAY) LIMITED

**Sales Order  
Number:** 10019243

**Sales Order Item:** 010

**Customer:** HAYES METAL REFINERIES LTD. PO Box 7116 WETHERHILL PARK

**Consignee:** HAYES METAL REFINERIES LTD 1/25 HOBART STREET RIVERSTONE

**Alloy Code:** BA170.3

**Note:** Chemical Composition WT. %

#### CERTIFICATE OF ANALYSIS

**Cast B32541 B32914**

Aluminium 99.88 99.87

Silicon 0.03 0.03

Iron 0.08 0.09

Copper 0.002 0.001

Manganese 0.001 0.001

Magnesium <0.001 <0.001

Chromium 0.001 <0.001

Zinc 0.001 0.002

Titanium <0.001 0.001

Vanadium 0.001 0.001

Gallium 0.014 0.014

Nickel 0.005 0.004

#### **Others Each**

Lead 0.001 0.001

Sodium 0.001

Boron 0.006 0.003

**Others Total** 0.007 0.005

[http://sales.riotintoaluminium.com/esales/delivery\\_document.aspx?document=MetPro...](http://sales.riotintoaluminium.com/esales/delivery_document.aspx?document=MetPro...) 7/10/2009

## LAMPIRAN 2. HASIL PENGUJIAN KOMPOSISI KIMIA (ICP) (BATCH 1)



### Analysis of 5 sample of Al alloy.

Report Date: 11/1/2011  
 Report Prepared by: Rabeya Akter  
 Laboratory Reference: ICP-2011-5  
 Date Sample Received: 12/12/2010

Report Prepared for: **Abdan Syakuura** **Dr. Ross Marceau** **Dr. Gang Sha**  
**ACMM-The University of Sydney** [ross.marceau@sydney.edu.au](mailto:ross.marceau@sydney.edu.au) [gang.sha@sydney.edu.au](mailto:gang.sha@sydney.edu.au)  
[abdansyakuura@gmail.com](mailto:abdansyakuura@gmail.com)  
 [tel.02 90366415]

### Researcher Reference:

### Description of Analysis

samples digested by mixture of HCl+HNO<sub>3</sub>+HF (3+1+trace), analysed by ICPOES. Report calculated as received.

Contacts: Rabeya Akter, r.akter@unsw.edu.au, Tel. +61-2-9385 4680; Dorothy Yu, d.yu@unsw.edu.au Tel +61-2-9385 5643, Fax +61-2-9385 7253.  
 Deliveries: ICP Laboratory, Ext.55643, 54680, Chemistry Store LG25, Chemical Sciences Building (F10), University of New South Wales, Kensington, NSW, 2052, Australia.  
 Laboratory: UNSW Analytical Centre, Room B36, Chemical Sciences Building (F10), University of New South Wales, Kensington, NSW, 2052, Australia.  
 Disclaimer: All samples reported as received and the University of New South Wales accepts no responsibility for the use of the values contained in this report.  
 Please note that unclaimed samples will be disposed within a month of receipt.

### Results

ID	Al	Cu	Fe	Mg	Si	Zn
	%. Wt	%. Wt	%. Wt	%. Wt	%. Wt	%. Wt
Abdan-01	92.2	0.87	0.07	1.42	0.02	3.77
Abdan-02	92.3	1.48	0.07	1.40	0.02	3.69
Abdan-03	91.1	1.79	0.08	1.43	0.02	3.84
Abdan-04	90.9	2.87	0.08	1.40	0.03	3.37
Abdan-05	90.6	3.16	0.07	1.31	0.02	3.31
Abdan-06	92.6	0.87	0.07	1.76	0.02	4.30
Abdan-07	90.8	1.42	0.07	1.67	0.02	4.20
Abdan-08	90.1	1.69	0.07	1.60	0.02	4.17
Abdan-09	89.9	2.25	0.07	1.63	0.02	4.26
Abdan-10	87.2	3.12	0.08	1.61	0.02	4.09
Abdan-11	92.6	0.80	0.06	1.96	0.02	5.06
Abdan-12	90.7	1.35	0.07	1.94	0.02	5.04
MDL	2.0	0.002	0.001	0.001	0.001	0.005

Cu, Fe, Mg & Zn is confirmed with BCS 263/2 CRM.  
 Si is not reliable.  
 MDL: Method detection limit, based on lowest detectable concentration multiplied by dilution factor of sample.  
 % of Al is as direct determination. This level of concentration should be balanced.  
 Rabeya



## HASIL PENGUJIAN KOMPOSISI KIMIA (ICP) (BATCH 2)



## Analysis of 11 sample of Al alloy.

Report Date: 7/2/2011  
 Report Prepared by: Rabeya Akter  
 Laboratory Reference: ICP-2011-64  
 Date Sample Received: 2/2/2011

Report Prepared for: **Abdan Syakuura** **Dr. Ross Marceau** **Dr. Gang Sha**  
[ross.marceau@sydney.edu.au](mailto:ross.marceau@sydney.edu.au) [gang.sha@sydney.edu.au](mailto:gang.sha@sydney.edu.au)  
[abdansyakuura@gmail.com](mailto:abdansyakuura@gmail.com)  
 [tel.02 90366415]

## Researcher Reference:

## Description of Analysis

samples digested by mixture of HCl+HNO<sub>3</sub>+HF (3+1+trace), analysed by ICPOES. Report calculated as received.

Contacts: Rabeya Akter, r.akter@unsw.edu.au, Tel. +61-2-9385 4680; Dorothy Yu, d.yu@unsw.edu.au Tel +61-2-9385 5643, Fax +61-2-9385 7253.  
 Deliveries: ICP Laboratory, Ext.55643, 54680, Chemistry Store LG25, Chemical Sciences Building (F10), University of New South Wales, Kensington, NSW, 2052, Australia.  
 Laboratory: UNSW Analytical Centre, Room B36, Chemical Sciences Building (F10), University of New South Wales, Kensington, NSW, 2052, Australia.  
 Disclaimer: All samples reported as received and the University of New South Wales accepts no responsibility for the use of the values contained in this report.  
 Please note that unclaimed samples will be disposed within a month of receipt.

## Results

ID	Al	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Zn
	%. Wt	%. Wt	%. Wt	%. Wt	%. Wt	%. Wt	%. Wt
Abdan-3/2	93.4	2.04	0.07	1.45	0.00	0.03	4.22
Abdan-9/2	90.4	2.60	0.07	1.74	0.00	0.03	5.16
Abdan-13	90.2	1.97	0.07	2.06	0.00	0.02	5.83
Abdan-14	89.8	2.56	0.07	2.06	0.00	0.02	6.22
Abdan-15	88.1	3.19	0.07	1.99	0.00	0.02	6.07
Abdan-16	90.9	0.79	0.07	2.52	0.00	0.02	7.21
Abdan-17	90.6	1.45	0.07	2.55	0.00	0.02	7.12
Abdan-18	88.9	1.97	0.07	2.42	0.00	0.02	6.90
Abdan-19	89.1	2.61	0.07	2.44	0.00	0.02	7.23
Abdan-20	88.8	2.96	0.07	2.39	0.00	0.02	7.38
Abdan-20/2	87.7	3.18	0.07	2.39	0.00	0.02	7.00
MDL	2.5	0.043	0.002	0.010	0.002	0.005	0.052

Cu, Fe, Mg, Mn & Zn is confirmed with BCS 263/2 CRM.  
 Si is not reliable.

MDL: Method detection limit, based on lowest detectable concentration multiplied by dilution factor of sample.

% of Al is as direct determination. This level of concentration should be balanced.

Rabeya

Universitas Indonesia

### LAMPIRAN 3. DATA PROSES PENGECORAN PADUAN Al-Zn-Mg-Cu

#### PADUAN Al-1.7Zn-1.7Mg-0.4Cu (at. %)

#### CASTING DATA SHEET

##### Atomic weight of the elements (gram/mol)

Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe
26.981	63.546	24.305	28.09	65.39	107.8682	118.71	72.61	55.845

ALLOY CODE		AZMC-401509/a/1 -22112010								
NOMINAL COMPOSITION										
	Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe	Σ
wt%	93.58601	0.91652	1.489836		4.007631					100
at%	96.20011	0.400015	1.700065	0	1.699805	0	0	0	0	100
ICP RESULTS										
ICP TEST DATE		11-January-2011								
	Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe	Σ
wt%	92.18979	0.872039	1.415612	0.024515	3.771141				0.072612	98.34571
at%	94.69276	0.380312	1.614137	0.024186	1.598282	0	0	0	0.036034	98.34571
CASTING INFORMATION						CHARGE MATERIAL INFORMATION				
CAST NUMBER		1				Expected Amount (g)		160		
CASTING DATE		Nov. 22, 2010				Al	149.9822			
PERSON/S INVOLVED		AS, BG				Cu	1.4679			
CASTING PARAMETERS						Mg	2.3889			
<i>temperature (°C)</i>	715	<i>heating off angle</i>	0°	Zn	6.4164					
	(713)	<i>Tilt speed 0</i>	100%	Si						
<i>washing before heating</i>	0 x	<i>Tilt angle 1</i>	58°	Ag						
<i>washing while heating</i>	0 x	<i>Tilt speed 1</i>	60%	Sn						
<i>flask/ingot while heat</i>	No	<i>Tilt angle 2</i>	75°							
<i>melting pressure (bar)</i>	-1.00	<i>Tilt speed 2</i>	60%	Total	160.2554					
<i>casting mold</i>	Ingot			STORAGE INFORMATION						
<i>casting mode</i>	Manual			CABINET NUMBER						
<i>casting pressure start</i>	80°			SHELF NUMBER	1					
<i>casting pressure (bar)</i>	0,00			CAST AMOUNT (g)						
<i>vibration time (s)</i>	10			REMAINING AMOUNT (g)						
<i>cooling time (s)</i>	290									
ADDITIONAL INFORMATION										
Holding time above 715°C		7 min								
Maximum temperatur reached (°C)		840								
Cast weight (gram)		154.273								
Residue weight (gram)		5.4165								
Unmelt metal (gram)										

**PADUAN Al-1.7Zn-1.7Mg-0.7Cu (at. %)****CASTING DATA SHEET****Atomic weight of the elements (gram/mol)**

Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe
26.981	63.546	24.305	28.09	65.39	107.8682	118.71	72.61	55.845

<b>ALLOY CODE</b>		AZMC-401516/a/1 -22112010								
<b>NOMINAL COMPOSITION</b>										
	Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe	Σ
wt%	92.9266	1.597592	1.483966		3.991842					100
at%	95.9001	0.700027	1.700065	0	1.699805	0	0	0	0	100
<b>ICP RESULTS</b>										
<b>ICP TEST DATE</b>		11-January-2011								
	Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe	Σ
wt%	92.26118	1.480299	1.402706	0.024129	3.692582				0.072591	98.93348
at%	95.05199	0.647532	1.604248	0.023878	1.569709	0	0	0	0.036133	98.93348
<b>CASTING INFORMATION</b>						<b>CHARGE MATERIAL INFORMATION</b>				
<b>CAST NUMBER</b>		1				<b>Expected Amount (g)</b>		160		
<b>CASTING DATE</b>		Nov. 22, 2010				Al	148.9089			
<b>PERSON/S INVOLVED</b>		AS, BG				Cu	2.5561			
<b>CASTING PARAMETERS</b>						Mg	2.3763			
<i>temperature (°C)</i>	725	<i>heating off angle</i>	0°			Zn	6.3804			
	(725)	<i>Tilt speed 0</i>	100%			Si				
<i>washing before heating</i>	0 x	<i>Tilt angle 1</i>	58°			Ag				
<i>washing while heating</i>	0 x	<i>Tilt speed 1</i>	60%			Sn				
<i>flask/ingot while heat</i>	No	<i>Tilt angle 2</i>	75°							
<i>melting pressure (bar)</i>	-1.00	<i>Tilt speed 2</i>	60%			Total	160.2217			
<i>casting mold</i>	Ingot					<b>STORAGE INFORMATION</b>				
<i>casting mode</i>	Manual					<b>CABINET NUMBER</b>				
<i>casting pressure start</i>	80°					<b>SHELF NUMBER</b>	2			
<i>casting pressure (bar)</i>	0.00					<b>CAST AMOUNT (g)</b>				
<i>vibration time (s)</i>	15					<b>REMAINING AMOUNT (g)</b>				
<i>cooling time (s)</i>	290									
<b>ADDITIONAL INFORMATION</b>										
<b>Holding time above 725°C</b>				6 min						
<b>Maximum temperatur reached (°C)</b>				815						
<b>Cast weight (gram)</b>				155.4868						
<b>Residue weight (gram)</b>				4.2284						
<b>Unmelt metal (gram)</b>										

**PADUAN Al-1.7Zn-1.7Mg-1.0Cu (at. %)****CASTING DATA SHEET****Atomic weight of the elements (gram/mol)**

Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe
26.981	63.546	24.305	28.09	65.39	107.8682	118.71	72.61	55.845

ALLOY CODE		AZMC-401523/a/1 -24112010								
NOMINAL COMPOSITION										
	Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe	Σ
wt%	92.27236	2.273317	1.478143		3.976176					100
at%	95.60009	1.000038	1.700065	0	1.699805	0	0	0	0	100
ICP RESULTS										
ICP TEST DATE		11-January-2011								
	Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe	Σ
wt%	91.08246	1.793012	1.428465	0.024065	3.839654				0.077226	98.24489
at%	94.12	0.786684	1.638623	0.023886	1.637141	0	0	0	0.038556	98.24489
CASTING INFORMATION						CHARGE MATERIAL INFORMATION				
CAST NUMBER		1				Expected Amount (g)		160		
CASTING DATE		Nov. 24, 2010				Al	149.8582			
PERSON/S INVOLVED		AS, BG				Cu	3.6385			
CASTING PARAMETERS						Mg	2.3692			
<i>temperature (°C)</i>	727	<i>heating off angle</i>	0°			Zn	6.3633			
	(729)	<i>Tilt speed 0</i>	100%			Si				
<i>washing before heating</i>	0 x	<i>Tilt angle 1</i>	58°			Ag				
<i>washing while heating</i>	0 x	<i>Tilt speed 1</i>	60%			Sn				
<i>flask/ingot while heat</i>	No	<i>Tilt angle 2</i>	75°							
<i>melting pressure (bar)</i>	-1.00	<i>Tilt speed 2</i>	60%			Total	162.2292			
<i>casting mold</i>	Ingot					STORAGE INFORMATION				
<i>casting mode</i>	Manual					CABINET NUMBER				
<i>casting pressure start</i>	80°					SHELF NUMBER	3			
<i>casting pressure (bar)</i>	0.00					CAST AMOUNT (g)				
<i>vibration time (s)</i>	20					REMAINING AMOUNT (g)				
<i>cooling time (s)</i>	290									
ADDITIONAL INFORMATION										
Holding time above 720°C				5 min						
Maximum temperatur reached (°C)				780						
Cast weight (gram)				153.2995						
Residue weight (gram)				6.0925						
				Unmelt metal (gram)						
Cu			0.49							

**PADUAN Al-1.7Zn-1.7Mg-1.3Cu (at. %)****CASTING DATA SHEET****Atomic weight of the elements (gram/mol)**

Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe
26.981	63.546	24.305	28.09	65.39	107.8682	118.71	72.61	55.845

<b>ALLOY CODE</b>		AZMC-401529/a/1 -24112010								
<b>NOMINAL COMPOSITION</b>										
	Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe	Σ
wt%	91.62324	2.94376	1.472365		3.960633					100
at%	95.30008	1.300049	1.700064	0	1.699804	0	0	0	0	100
<b>ICP RESULTS</b>										
<b>ICP TEST DATE</b>		11-January-2011								
	Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe	Σ
wt%	90.8854	2.872016	1.404305	0.025832	3.365442				0.084646	98.63764
at%	94.24833	1.26455	1.616603	0.02573	1.440019	0	0	0	0.042409	98.63764
<b>CASTING INFORMATION</b>						<b>CHARGE MATERIAL INFORMATION</b>				
<b>CAST NUMBER</b>		1				<b>Expected Amount (g)</b>		160		
<b>CASTING DATE</b>		Nov. 24, 2010				Al	146.821			
<b>PERSON/S INVOLVED</b>		AS, BG				Cu	4.7082			
<b>CASTING PARAMETERS</b>						Mg	2.3574			
<i>temperature (°C)</i>	727	<i>heating off angle</i>	0°			Zn	6.3369			
	(764)	<i>Tilt speed 0</i>	100%			Si				
<i>washing before heating</i>	0 x	<i>Tilt angle 1</i>	58°			Ag				
<i>washing while heating</i>	0 x	<i>Tilt speed 1</i>	60%			Sn				
<i>flask/ingot while heat</i>	No	<i>Tilt angle 2</i>	75°							
<i>melting pressure (bar)</i>	-1.00	<i>Tilt speed 2</i>	60%			Total	160.2235			
<i>casting mold</i>	Ingot					<b>STORAGE INFORMATION</b>				
<i>casting mode</i>	Manual					<b>CABINET NUMBER</b>				
<i>casting pressure start</i>	80°					<b>SHELF NUMBER</b>	4			
<i>casting pressure (bar)</i>	0.00					<b>CAST AMOUNT (g)</b>				
<i>vibration time (s)</i>	20					<b>REMAINING AMOUNT (g)</b>				
<i>cooling time (s)</i>	290									
<b>ADDITIONAL INFORMATION</b>										
<b>Holding time above 720°C</b>				7 min						
<b>Maximum temperatur reached (°C)</b>				770						
<b>Cast weight (gram)</b>				152.2469						
<b>Residue weight (gram)</b>				6.5184						
<b>Unmelt metal (gram)</b>										



**PADUAN Al-1.7Zn-1.7Mg-1.6Cu (at. %)****CASTING DATA SHEET****Atomic weight of the elements (gram/mol)**

Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe
26.981	63.546	24.305	28.09	65.39	107.8682	118.71	72.61	55.845

<b>ALLOY CODE</b>		AZMC-401536/a/1 -26112010								
<b>NOMINAL COMPOSITION</b>										
	Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe	Σ
wt%	90.97918	3.608981	1.466631		3.945211					100
at%	95.00007	1.60006	1.700064	0	1.699804	0	0	0	0	100
<b>ICP RESULTS</b>										
<b>ICP TEST DATE</b>		11-January-2011								
	Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe	Σ
wt%	90.60709	3.158437	1.306692	0.022736	3.307476				0.071914	98.47434
at%	94.09907	1.392724	1.506464	0.02268	1.417316	0	0	0	0.036084	98.47434
<b>CASTING INFORMATION</b>						<b>CHARGE MATERIAL INFORMATION</b>				
<b>CAST NUMBER</b>		1				<b>Expected Amount (g)</b>		160		
<b>CASTING DATE</b>		Nov. 26, 2010				Al	145.8034			
<b>PERSON/S INVOLVED</b>		AS, BG, FA				Cu	5.7776			
<b>CASTING PARAMETERS</b>						Mg	2.3488			
<i>temperature (°C)</i>	720	<i>heating off angle</i>	0°			Zn	6.3136			
	(749)	<i>Tilt speed 0</i>	100%			Si				
<i>washing before heating</i>	0 x	<i>Tilt angle 1</i>	58°			Ag				
<i>washing while heating</i>	0 x	<i>Tilt speed 1</i>	60%			Sn				
<i>flask/ingot while heat</i>	No	<i>Tilt angle 2</i>	75°							
<i>melting pressure (bar)</i>	-1.00	<i>Tilt speed 2</i>	60%			Total	160.2434			
<i>casting mold</i>	Ingot					<b>STORAGE INFORMATION</b>				
<i>casting mode</i>	Manual					<b>CABINET NUMBER</b>				
<i>casting pressure start</i>	80°					<b>SHELF NUMBER</b>	5			
<i>casting pressure (bar)</i>	0.00					<b>CAST AMOUNT (g)</b>				
<i>vibration time (s)</i>	20					<b>REMAINING AMOUNT (g)</b>				
<i>cooling time (s)</i>	290									
<b>ADDITIONAL INFORMATION</b>										
<b>Holding time above 750°C</b>				7 min						
<b>Maximum temperatur reached (°C)</b>				753						
<b>Cast weight (gram)</b>				155.7402						
<b>Residue weight (gram)</b>				3.5563						
<b>Unmelt metal (gram)</b>										

**PADUAN Al-2.1Zn-2.1Mg-0.4Cu (at. %)****CASTING DATA SHEET****Atomic weight of the elements (gram/mol)**

Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe
26.981	63.546	24.305	28.09	65.39	107.8682	118.71	72.61	55.845

<b>ALLOY CODE</b>		AZMC-491809/a1 -26112010								
<b>NOMINAL COMPOSITION</b>										
	Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe	Σ
wt%	92.332	0.911822	1.830952		4.925226					100
at%	95.40014	0.400015	2.100081	0	2.09976	0	0	0	0	100
<b>ICP RESULTS</b>										
<b>ICP TEST DATE</b>		11-January-2011								
	Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe	Σ
wt%	92.63977	0.86819	1.757425	0.023274	4.299239				0.071177	99.65908
at%	95.38583	0.379552	2.008749	0.023018	1.826521	0	0	0	0.035408	99.65908
<b>CASTING INFORMATION</b>						<b>CHARGE MATERIAL INFORMATION</b>				
<b>CAST NUMBER</b>		1				<b>Expected Amount (g)</b>		160		
<b>CASTING DATE</b>		Nov. 26, 2010				Al	147.948			
<b>PERSON/S INVOLVED</b>		AS, BG, FA				Cu	1.4564			
<b>CASTING PARAMETERS</b>						Mg	2.9378			
<i>temperature (°C)</i>	720	<i>heating off angle</i>	0°			Zn	7.8834			
	(753)	<i>Tilt speed 0</i>	100%			Si				
<i>washing before heating</i>	0 x	<i>Tilt angle 1</i>	58°			Ag				
<i>washing while heating</i>	0 x	<i>Tilt speed 1</i>	60%			Sn				
<i>flask/ingot while heat</i>	No	<i>Tilt angle 2</i>	75°							
<i>melting pressure (bar)</i>	-1.00	<i>Tilt speed 2</i>	60%			Total	160.2256			
<i>casting mold</i>	Ingot					<b>STORAGE INFORMATION</b>				
<i>casting mode</i>	Manual					<b>CABINET NUMBER</b>				
<i>casting pressure start</i>	80°					<b>SHELF NUMBER</b>	6			
<i>casting pressure (bar)</i>	0.00					<b>CAST AMOUNT (g)</b>				
<i>vibration time (s)</i>	22					<b>REMAINING AMOUNT (g)</b>				
<i>cooling time (s)</i>	290									
<b>ADDITIONAL INFORMATION</b>										
<b>Holding time above 750°C</b>				7 min						
<b>Maximum temperatur reached (°C)</b>				823						
<b>Cast weight (gram)</b>				154.6917						
<b>Residue weight (gram)</b>				4.3506						
<b>Unmelt metal (gram)</b>										

**PADUAN Al-2.1Zn-2.1Mg-0.7Cu (at. %)****CASTING DATA SHEET****Atomic weight of the elements (gram/mol)**

Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe
26.981	63.546	24.305	28.09	65.39	107.8682	118.71	72.61	55.845

<b>ALLOY CODE</b>		AZMC-491816/a/1 -30112010								
<b>NOMINAL COMPOSITION</b>										
	Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe	Σ
wt%	91.68087	1.589434	1.823775		4.90592					100
at%	95.10013	0.700027	2.100081	0	2.09976	0	0	0	0	100
<b>ICP RESULTS</b>										
<b>ICP TEST DATE</b>		11-January-2011								
	Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe	Σ
wt%	90.77633	1.424231	1.6675	0.023317	4.197349				0.071758	98.16048
at%	93.77547	0.624693	1.912251	0.023137	1.789116	0	0	0	0.035814	98.16048
<b>CASTING INFORMATION</b>						<b>CHARGE MATERIAL INFORMATION</b>				
<b>CAST NUMBER</b>		1				<b>Expected Amount (g)</b>		160		
<b>CASTING DATE</b>		Nov. 30, 2010				Al	146.9069			
<b>PERSON/S INVOLVED</b>		AS, BG				Cu	2.5452			
<b>CASTING PARAMETERS</b>						Mg	2.9215			
<i>temperature (°C)</i>	720	<i>heating off angle</i>	0°			Zn	7.8498			
	(757)	<i>Tilt speed 0</i>	100%			Si				
<i>washing before heating</i>	0 x	<i>Tilt angle 1</i>	58°			Ag				
<i>washing while heating</i>	0 x	<i>Tilt speed 1</i>	60%			Sn				
<i>flask/ingot while heat</i>	No	<i>Tilt angle 2</i>	75°							
<i>melting pressure (bar)</i>	-1.00	<i>Tilt speed 2</i>	60%			Total	160.2234			
<i>casting mold</i>	Ingot					<b>STORAGE INFORMATION</b>				
<i>casting mode</i>	Manual					<b>CABINET NUMBER</b>				
<i>casting pressure start</i>	80°					<b>SHELF NUMBER</b>	7			
<i>casting pressure (bar)</i>	0.00					<b>CAST AMOUNT (g)</b>				
<i>vibration time (s)</i>	15					<b>REMAINING AMOUNT (g)</b>				
<i>cooling time (s)</i>	285									
<b>ADDITIONAL INFORMATION</b>										
<b>Holding time above 750°C</b>				7 min						
<b>Maximum temperatur reached (°C)</b>				763						
<b>Cast weight (gram)</b>				155.5088						
<b>Residue weight (gram)</b>				3.3778						
<b>Unmelt metal (gram)</b>										

**PADUAN Al-2.1Zn-2.1Mg-1.0Cu (at. %)****CASTING DATA SHEET****Atomic weight of the elements (gram/mol)**

Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe
26.981	63.546	24.305	28.09	65.39	107.8682	118.71	72.61	55.845

<b>ALLOY CODE</b>		AZMC-491823/a/1 -30112010									
<b>NOMINAL COMPOSITION</b>											
	Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe	Σ	
wt%	91.03483	2.261755	1.816654		4.886765					100	
at%	94.80012	1.000038	2.100081	0	2.099759	0	0	0	0	100	
<b>ICP RESULTS</b>											
<b>ICP TEST DATE</b>		11-January-2011									
	Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe	Σ	
wt%	90.11007	1.687094	1.599273	0.021797	4.170837				0.070675	97.65975	
at%	93.24362	0.741233	1.837092	0.021665	1.780802	0	0	0	0.035333	97.65975	
<b>CASTING INFORMATION</b>						<b>CHARGE MATERIAL INFORMATION</b>					
<b>CAST NUMBER</b>		1				<b>Expected Amount (g)</b>		160			
<b>CASTING DATE</b>		Nov. 30, 2010				Al	145.8749				
<b>PERSON/S INVOLVED</b>		AS, BG				Cu	3.6187				
<b>CASTING PARAMETERS</b>						Mg	2.9098				
<i>temperature (°C)</i>	720	<i>heating off angle</i>	0°			Zn	7.8186				
	(757)	<i>Tilt speed 0</i>	100%			Si					
<i>washing before heating</i>	0 x	<i>Tilt angle 1</i>	58°			Ag					
<i>washing while heating</i>	0 x	<i>Tilt speed 1</i>	60%			Sn					
<i>flask/ingot while heat</i>	No	<i>Tilt angle 2</i>	75°								
<i>melting pressure (bar)</i>	-1.00	<i>Tilt speed 2</i>	60%			Total	160.222				
<i>casting mold</i>	Ingot					<b>STORAGE INFORMATION</b>					
<i>casting mode</i>	Manual					<b>CABINET NUMBER</b>					
<i>casting pressure start</i>	80°					<b>SHELF NUMBER</b>	8				
<i>casting pressure (bar)</i>	0.00					<b>CAST AMOUNT (g)</b>					
<i>vibration time (s)</i>	15					<b>REMAINING AMOUNT (g)</b>					
<i>cooling time (s)</i>	285										
<b>ADDITIONAL INFORMATION</b>											
<b>Holding time above 750°C</b>				7 min							
<b>Maximum temperatur reached (°C)</b>				764							
<b>Cast weight (gram)</b>				155.718							
<b>Residue weight (gram)</b>				3.2446							
<b>Unmelt metal (gram)</b>											

**PADUAN Al-2.1Zn-2.1Mg-1.3Cu (at. %)****CASTING DATA SHEET****Atomic weight of the elements (gram/mol)**

Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe
26.981	63.546	24.305	28.09	65.39	107.8682	118.71	72.61	55.845

ALLOY CODE		AZMC-491829/a1 -01122010								
NOMINAL COMPOSITION										
	Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe	Σ
wt%	90.39381	2.928846	1.809589		4.86776					100
at%	94.50011	1.30005	2.10008	0	2.099759	0	0	0	0	100
ICP RESULTS										
ICP TEST DATE		11-January-2011								
	Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe	Σ
wt%	89.8614	2.245744	1.633938	0.022638	4.263166				0.067487	98.09437
at%	93.33647	0.990394	1.88398	0.022585	1.827078	0	0	0	0.033867	98.09437
CASTING INFORMATION						CHARGE MATERIAL INFORMATION				
CAST NUMBER		1				Expected Amount (g)		160		
CASTING DATE		Dec. 1, 2010				Al	144.8471			
PERSON/S INVOLVED		AS, BG				Cu	4.6878			
CASTING PARAMETERS						Mg	2.8984			
<i>temperature (°C)</i>	720	<i>heating off angle</i>	0°			Zn	7.7886			
	(751)	<i>Tilt speed 0</i>	100%			Si				
<i>washing before heating</i>	0 x	<i>Tilt angle 1</i>	58°			Ag				
<i>washing while heating</i>	0 x	<i>Tilt speed 1</i>	60%			Sn				
<i>flask/ingot while heat</i>	No	<i>Tilt angle 2</i>	75°							
<i>melting pressure (bar)</i>	-1.00	<i>Tilt speed 2</i>	60%			Total	160.2219			
<i>casting mold</i>	Ingot					STORAGE INFORMATION				
<i>casting mode</i>	Manual					CABINET NUMBER				
<i>casting pressure start</i>	80°					SHELF NUMBER	9			
<i>casting pressure (bar)</i>	0.00					CAST AMOUNT (g)				
<i>vibration time (s)</i>	15					REMAINING AMOUNT (g)				
<i>cooling time (s)</i>	290									
ADDITIONAL INFORMATION										
Holding time above 750°C				6 min						
Maximum temperatur reached (°C)				768						
Cast weight (gram)				154.5276						
Residue weight (gram)				4.3758						
Unmelt metal (gram)										
Cu		0.3722								



**PADUAN Al-2.1Zn-2.1Mg-1.6Cu (at. %)****CASTING DATA SHEET****Atomic weight of the elements (gram/mol)**

Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe
26.981	63.546	24.305	28.09	65.39	107.8682	118.71	72.61	55.845

<b>ALLOY CODE</b>		AZMC-491836/a/1 -01122010								
<b>NOMINAL COMPOSITION</b>										
	Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe	Σ
wt%	89.75775	3.590768	1.802578		4.848901					100
at%	94.2001	1.600061	2.10008	0	2.099759	0	0	0	0	100
<b>ICP RESULTS</b>										
<b>ICP TEST DATE</b>		11-January-2011								
	Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe	Σ
wt%	87.1525	3.118895	1.608876	0.021609	4.085726				0.083721	96.07133
at%	90.99961	1.382707	1.864853	0.021672	1.760255	0	0	0	0.042235	96.07133
<b>CASTING INFORMATION</b>						<b>CHARGE MATERIAL INFORMATION</b>				
<b>CAST NUMBER</b>		1				<b>Expected Amount (g)</b>		160		
<b>CASTING DATE</b>		Dec. 1, 2010				Al	143.9705			
<b>PERSON/S INVOLVED</b>		AS, BG				Cu	5.7462			
<b>CASTING PARAMETERS</b>						Mg	2.8876			
<i>temperature (°C)</i>	720	<i>heating off angle</i>	0°			Zn	7.7588			
	(754)	<i>Tilt speed 0</i>	100%			Si				
<i>washing before heating</i>	0 x	<i>Tilt angle 1</i>	58°			Ag				
<i>washing while heating</i>	0 x	<i>Tilt speed 1</i>	60%			Sn				
<i>flask/ingot while heat</i>	No	<i>Tilt angle 2</i>	75°							
<i>melting pressure (bar)</i>	-1.00	<i>Tilt speed 2</i>	60%			Total	160.3631			
<i>casting mold</i>	Ingot					<b>STORAGE INFORMATION</b>				
<i>casting mode</i>	Manual					<b>CABINET NUMBER</b>				
<i>casting pressure start</i>	80°					<b>SHELF NUMBER</b>	10			
<i>casting pressure (bar)</i>	0.00					<b>CAST AMOUNT (g)</b>				
<i>vibration time (s)</i>	20					<b>REMAINING AMOUNT (g)</b>				
<i>cooling time (s)</i>	290									
<b>ADDITIONAL INFORMATION</b>										
<b>Holding time above 750°C</b>				7 min						
<b>Maximum temperatur reached (°C)</b>				772						
<b>Cast weight (gram)</b>				155.5558						
<b>Residue weight (gram)</b>				3.6175						
<b>Unmelt metal (gram)</b>										

**PADUAN Al-2.5Zn-2.5Mg-0.4Cu (at. %)****CASTING DATA SHEET****Atomic weight of the elements (gram/mol)**

Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe
26.981	63.546	24.305	28.09	65.39	107.8682	118.71	72.61	55.845

<b>ALLOY CODE</b>		AZMC-582209/a/1 -01122010								
<b>NOMINAL COMPOSITION</b>										
	Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe	Σ
wt%	91.09078	0.907172	2.168588		5.833461					100
at%	94.60017	0.400016	2.500097	0	2.499715	0	0	0	0	100
<b>ICP RESULTS</b>										
<b>ICP TEST DATE</b>		11-January-2011								
	Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe	Σ
wt%	92.60993	0.797983	1.963112	0.021326	5.062061				0.064115	100.5185
at%	95.70464	0.350138	2.252076	0.021168	2.158488	0	0	0	0.032012	100.5185
<b>CASTING INFORMATION</b>						<b>CHARGE MATERIAL INFORMATION</b>				
<b>CAST NUMBER</b>		1				<b>Expected Amount (g)</b>		160		
<b>CASTING DATE</b>		Dec. 1, 2010				Al	145.9653			
<b>PERSON/S INVOLVED</b>		AS, BG				Cu	1.4526			
<b>CASTING PARAMETERS</b>						Mg	3.4752			
<i>temperature (°C)</i>	715	<i>heating off angle</i>	0°			Zn	9.3353			
	(755)	<i>Tilt speed 0</i>	100%			Si				
<i>washing before heating</i>	0 x	<i>Tilt angle 1</i>	58°			Ag				
<i>washing while heating</i>	0 x	<i>Tilt speed 1</i>	60%			Sn				
<i>flask/ingot while heat</i>	No	<i>Tilt angle 2</i>	75°							
<i>melting pressure (bar)</i>	-1.00	<i>Tilt speed 2</i>	60%			Total	160.2284			
<i>casting mold</i>	Ingot					<b>STORAGE INFORMATION</b>				
<i>casting mode</i>	Manual					<b>CABINET NUMBER</b>				
<i>casting pressure start</i>	80°					<b>SHELF NUMBER</b>	11			
<i>casting pressure (bar)</i>	0.00					<b>CAST AMOUNT (g)</b>				
<i>vibration time (s)</i>	20					<b>REMAINING AMOUNT (g)</b>				
<i>cooling time (s)</i>	290									
<b>ADDITIONAL INFORMATION</b>										
<b>Holding time above 750°C</b>				7 min						
<b>Maximum temperatur reached (°C)</b>				766						
<b>Cast weight (gram)</b>				154.6586						
<b>Residue weight (gram)</b>				4.3437						
<b>Unmelt metal (gram)</b>										

**PADUAN Al-2.5Zn-2.5Mg-0.7Cu (at. %)****CASTING DATA SHEET****Atomic weight of the elements (gram/mol)**

Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe
26.981	63.546	24.305	28.09	65.39	107.8682	118.71	72.61	55.845

<b>ALLOY CODE</b>		AZMC-582216/a/1 -01122010									
<b>NOMINAL COMPOSITION</b>											
	Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe	Σ	
wt%	90.4478	1.58136	2.160131		5.810711					100	
at%	94.30016	0.700027	2.500097	0	2.499715	0	0	0	0	100	
<b>ICP RESULTS</b>											
<b>ICP TEST DATE</b>		11-January-2011									
	Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe	Σ	
wt%	90.67353	1.354671	1.943481	0.021632	5.041244				0.068018	99.10258	
at%	94.05473	0.596628	2.237911	0.021553	2.157668	0	0	0	0.034088	99.10258	
<b>CASTING INFORMATION</b>						<b>CHARGE MATERIAL INFORMATION</b>					
<b>CAST NUMBER</b>		1				<b>Expected Amount (g)</b>		160			
<b>CASTING DATE</b>		Dec. 1, 2010				Al	144.9327				
<b>PERSON/S INVOLVED</b>		AS, BG				Cu	2.5305				
<b>CASTING PARAMETERS</b>						Mg	3.4598				
<i>temperature (°C)</i>	715	<i>heating off angle</i>	0°			Zn	9.2987				
	(756)	<i>Tilt speed 0</i>	100%			Si					
<i>washing before heating</i>	0 x	<i>Tilt angle 1</i>	58°			Ag					
<i>washing while heating</i>	0 x	<i>Tilt speed 1</i>	60%			Sn					
<i>flask/ingot while heat</i>	No	<i>Tilt angle 2</i>	75°								
<i>melting pressure (bar)</i>	-1.00	<i>Tilt speed 2</i>	60%			Total	160.2217				
<i>casting mold</i>	Ingot					<b>STORAGE INFORMATION</b>					
<i>casting mode</i>	Manual					<b>CABINET NUMBER</b>					
<i>casting pressure start</i>	80°					<b>SHELF NUMBER</b>	12				
<i>casting pressure (bar)</i>	0.00					<b>CAST AMOUNT (g)</b>					
<i>vibration time (s)</i>	20					<b>REMAINING AMOUNT (g)</b>					
<i>cooling time (s)</i>	290										
<b>ADDITIONAL INFORMATION</b>											
<b>Holding time above 750°C</b>				7 min							
<b>Maximum temperatur reached (°C)</b>				763							
<b>Cast weight (gram)</b>				155.1561							
<b>Residue weight (gram)</b>				4.453							
<b>Unmelt metal (gram)</b>											

**PADUAN Al-2.5Zn-2.5Mg-1.0Cu (at. %)****CASTING DATA SHEET****Atomic weight of the elements (gram/mol)**

Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe
26.981	63.546	24.305	28.09	65.39	107.8682	118.71	72.61	55.845

<b>ALLOY CODE</b>		AZMC-582223/a/1 -25012011									
<b>NOMINAL COMPOSITION</b>											
	Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe	Σ	
wt%	89.80981	2.250309	2.151739		5.788139					100	
at%	94.00015	1.000039	2.500097	0	2.499714	0	0	0	0	100	
<b>ICP RESULTS</b>											
<b>ICP TEST DATE</b>		01-February-2011									
	Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe	Σ	
wt%	90.15022	1.965827	2.061266	0.02456	5.826218				0.06573	100.0938	
at%	94.25728	0.872696	2.392459	0.024665	2.513515	0	0	0	0.033204	100.0938	
<b>CASTING INFORMATION</b>						<b>CHARGE MATERIAL INFORMATION</b>					
<b>CAST NUMBER</b>		1				<b>Expected Amount (g)</b>		160			
<b>CASTING DATE</b>		Jan. 25, 2011				Al	143.7664				
<b>PERSON/S INVOLVED</b>		AS, BG				Cu	3.6035				
<b>CASTING PARAMETERS</b>						Mg	3.619				
<i>temperature (°C)</i>	705	<i>heating off angle</i>	0°			Zn	10.1873				
	(723)	<i>Tilt speed 0</i>	100%			Si					
<i>washing before heating</i>	0 x	<i>Tilt angle 1</i>	58°			Ag					
<i>washing while heating</i>	0 x	<i>Tilt speed 1</i>	60%			Sn					
<i>flask/ingot while heat</i>	No	<i>Tilt angle 2</i>	75°								
<i>melting pressure (bar)</i>	-1.00	<i>Tilt speed 2</i>	60%			Total	161.1762				
<i>casting mold</i>	Ingot					<b>STORAGE INFORMATION</b>					
<i>casting mode</i>	Manual					<b>CABINET NUMBER</b>					
<i>casting pressure start</i>	80°					<b>SHELF NUMBER</b>	13				
<i>casting pressure (bar)</i>	0.00					<b>CAST AMOUNT (g)</b>					
<i>vibration time (s)</i>	20					<b>REMAINING AMOUNT (g)</b>					
<i>cooling time (s)</i>	290										
<b>ADDITIONAL INFORMATION</b>											
<b>Holding time above 715°C</b>				8 min							
<b>Maximum temperatur reached (°C)</b>				755							
<b>Cast weight (gram)</b>				155.3802							
<b>Residue weight (gram)</b>				4.6308							
<b>Unmelt metal (gram)</b>											
<b>Element compensation (add to initial mass)</b>				Zn: 10%; Mg: 5%							

**PADUAN Al-2.5Zn-2.5Mg-1.3Cu (at. %)****CASTING DATA SHEET****Atomic weight of the elements (gram/mol)**

Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe
26.981	63.546	24.305	28.09	65.39	107.8682	118.71	72.61	55.845

<b>ALLOY CODE</b>		AZMC-582129/a1 -25012011								
<b>NOMINAL COMPOSITION</b>										
	Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe	Σ
wt%	89.17676	2.914082	2.143413		5.765741					100
at%	93.70014	1.30005	2.500096	0	2.499714	0	0	0	0	100
<b>ICP RESULTS</b>										
<b>ICP TEST DATE</b>		01-February-2011								
	Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe	Σ
wt%	89.83713	2.555213	2.064641	0.02412	6.221438				0.066878	100.7694
at%	94.4612	1.14076	2.40993	0.024361	2.6992	0	0	0	0.033975	100.7694
<b>CASTING INFORMATION</b>						<b>CHARGE MATERIAL INFORMATION</b>				
<b>CAST NUMBER</b>		1				<b>Expected Amount (g)</b>		160		
<b>CASTING DATE</b>		Jan. 25, 2011				Al	142.7455			
<b>PERSON/S INVOLVED</b>		AS, BG				Cu	4.6635			
<b>CASTING PARAMETERS</b>						Mg	3.6054			
<i>temperature (°C)</i>	705	<i>heating off angle</i>	0°			Zn	10.6081			
	(724)	<i>Tilt speed 0</i>	100%			Si				
<i>washing before heating</i>	0 x	<i>Tilt angle 1</i>	58°			Ag				
<i>washing while heating</i>	0 x	<i>Tilt speed 1</i>	60%			Sn				
<i>flask/ingot while heat</i>	No	<i>Tilt angle 2</i>	75°							
<i>melting pressure (bar)</i>	-1.00	<i>Tilt speed 2</i>	60%			Total	161.6225			
<i>casting mold</i>	Ingot					<b>STORAGE INFORMATION</b>				
<i>casting mode</i>	Manual					<b>CABINET NUMBER</b>				
<i>casting pressure start</i>	80°					<b>SHELF NUMBER</b>	14			
<i>casting pressure (bar)</i>	0.00					<b>CAST AMOUNT (g)</b>				
<i>vibration time (s)</i>	20					<b>REMAINING AMOUNT (g)</b>				
<i>cooling time (s)</i>	290									
<b>ADDITIONAL INFORMATION</b>										
<b>Holding time above 715°C</b>				9 min						
<b>Maximum temperatur reached (°C)</b>				732						
<b>Cast weight (gram)</b>				156.5829						
<b>Residue weight (gram)</b>				4.2143						
<b>Unmelt metal (gram)</b>										
<b>Element compensation (add to initial mass)</b>				Zn: 15%; Mg: 5%						



**PADUAN Al-2.5Zn-2.5Mg-1.6Cu (at. %)****CASTING DATA SHEET****Atomic weight of the elements (gram/mol)**

Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe
26.981	63.546	24.305	28.09	65.39	107.8682	118.71	72.61	55.845

<b>ALLOY CODE</b>		AZMC-572136/a1 -25012011								
<b>NOMINAL COMPOSITION</b>										
	Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe	Σ
wt%	88.5486	3.572737	2.135151		5.743515					100
at%	93.40013	1.600062	2.500096	0	2.499714	0	0	0	0	100
<b>ICP RESULTS</b>										
<b>ICP TEST DATE</b>		01-February-2011								
	Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe	Σ
wt%	88.12661	3.186483	1.988008	0.023341	6.073162				0.067907	99.46551
at%	93.00568	1.427854	2.329072	0.023661	2.644624	0	0	0	0.034625	99.46551
<b>CASTING INFORMATION</b>						<b>CHARGE MATERIAL INFORMATION</b>				
<b>CAST NUMBER</b>		1				<b>Expected Amount (g)</b>		160		
<b>CASTING DATE</b>		Jan. 25, 2011				Al	141.6368			
<b>PERSON/S INVOLVED</b>		AS, BG				Cu	5.7166			
<b>CASTING PARAMETERS</b>						Mg	3.5907			
<i>temperature (°C)</i>	705	<i>heating off angle</i>	0°			Zn	10.568			
	(723)	<i>Tilt speed 0</i>	100%			Si				
<i>washing before heating</i>	0 x	<i>Tilt angle 1</i>	58°			Ag				
<i>washing while heating</i>	0 x	<i>Tilt speed 1</i>	60%			Sn				
<i>flask/ingot while heat</i>	No	<i>Tilt angle 2</i>	75°							
<i>melting pressure (bar)</i>	-1.00	<i>Tilt speed 2</i>	60%			Total	161.5121			
<i>casting mold</i>	Ingot					<b>STORAGE INFORMATION</b>				
<i>casting mode</i>	Manual					<b>CABINET NUMBER</b>				
<i>casting pressure start</i>	80°					<b>SHELF NUMBER</b>	15			
<i>casting pressure (bar)</i>	0.00					<b>CAST AMOUNT (g)</b>				
<i>vibration time (s)</i>	20					<b>REMAINING AMOUNT (g)</b>				
<i>cooling time (s)</i>	290									
<b>ADDITIONAL INFORMATION</b>										
<b>Holding time above 715°C</b>				10 min						
<b>Maximum temperatur reached (°C)</b>				742						
<b>Cast weight (gram)</b>				156.6173						
<b>Residue weight (gram)</b>				4.1264						
<b>Unmelt metal (gram)</b>										
<b>Element compensation (add to initial mass)</b>				Zn: 15%; Mg: 5%						

**PADUAN Al-2.9Zn-2.9Mg-0.4Cu (at. %)****CASTING DATA SHEET****Atomic weight of the elements (gram/mol)**

Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe
26.981	63.546	24.305	28.09	65.39	107.8682	118.71	72.61	55.845

<b>ALLOY CODE</b>		AZMC-672509/a/1 -25012011								
<b>NOMINAL COMPOSITION</b>										
	Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe	Σ
wt%	89.86216	0.902569	2.502797		6.732478					100
at%	93.8002	0.400016	2.900114	0	2.89967	0	0	0	0	100
<b>ICP RESULTS</b>										
<b>ICP TEST DATE</b>		01-February-2011								
	Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe	Σ
wt%	90.8718	0.794439	2.524292	0.024043	7.212562				0.069166	101.4963
at%	95.04106	0.352787	2.930787	0.024153	3.112565	0	0	0	0.03495	101.4963
<b>CASTING INFORMATION</b>						<b>CHARGE MATERIAL INFORMATION</b>				
<b>CAST NUMBER</b>		1				<b>Expected Amount (g)</b>		160		
<b>CASTING DATE</b>		Jan. 25, 2011				Al	143.8508			
<b>PERSON/S INVOLVED</b>		AS, BG				Cu	1.4447			
<b>CASTING PARAMETERS</b>						Mg	4.2101			
<i>temperature (°C)</i>	705	<i>heating off angle</i>	0°			Zn	11.8492			
	(724)	<i>Tilt speed 0</i>	100%			Si				
<i>washing before heating</i>	0 x	<i>Tilt angle 1</i>	58°			Ag				
<i>washing while heating</i>	0 x	<i>Tilt speed 1</i>	60%			Sn				
<i>flask/ingot while heat</i>	No	<i>Tilt angle 2</i>	75°							
<i>melting pressure (bar)</i>	-1.00	<i>Tilt speed 2</i>	60%			Total	161.3548			
<i>casting mold</i>	Ingot					<b>STORAGE INFORMATION</b>				
<i>casting mode</i>	Manual					<b>CABINET NUMBER</b>				
<i>casting pressure start</i>	80°					<b>SHELF NUMBER</b>	16			
<i>casting pressure (bar)</i>	0.00					<b>CAST AMOUNT (g)</b>				
<i>vibration time (s)</i>	20					<b>REMAINING AMOUNT (g)</b>				
<i>cooling time (s)</i>	290									
<b>ADDITIONAL INFORMATION</b>										
<b>Holding time above 715°C</b>				8 min						
<b>Maximum temperatur reached (°C)</b>				736						
<b>Cast weight (gram)</b>				155.944						
<b>Residue weight (gram)</b>				4.2165						
<b>Unmelt metal (gram)</b>										
<b>Element compensation (add to initial mass)</b>				Zn: 10%; Mg: 5%						

**PADUAN Al-2.9Zn-2.9Mg-0.7Cu (at. %)****CASTING DATA SHEET****Atomic weight of the elements (gram/mol)**

Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe
26.981	63.546	24.305	28.09	65.39	107.8682	118.71	72.61	55.845

<b>ALLOY CODE</b>		AZMC-672516/a/1 -25012011								
<b>NOMINAL COMPOSITION</b>										
	Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe	Σ
wt%	89.22719	1.573367	2.493086		6.706356					100
at%	93.50019	0.700027	2.900113	0	2.89967	0	0	0	0	100
<b>ICP RESULTS</b>										
<b>ICP TEST DATE</b>		01-February-2011								
	Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe	Σ
wt%	90.58446	1.448422	2.552841	0.024756	7.120751				0.06999	101.8012
at%	95.03963	0.645232	2.97329	0.024948	3.082645	0	0	0	0.035478	101.8012
<b>CASTING INFORMATION</b>						<b>CHARGE MATERIAL INFORMATION</b>				
<b>CAST NUMBER</b>		1				<b>Expected Amount (g)</b>		160		
<b>CASTING DATE</b>		Jan. 25, 2011				Al	142.8226			
<b>PERSON/S INVOLVED</b>		AS, BG				Cu	2.5178			
<b>CASTING PARAMETERS</b>						Mg	4.1925			
<i>temperature (°C)</i>	705	<i>heating off angle</i>	0°			Zn	11.8034			
	(728)	<i>Tilt speed 0</i>	100%			Si				
<i>washing before heating</i>	0 x	<i>Tilt angle 1</i>	58°			Ag				
<i>washing while heating</i>	0 x	<i>Tilt speed 1</i>	60%			Sn				
<i>flask/ingot while heat</i>	No	<i>Tilt angle 2</i>	75°							
<i>melting pressure (bar)</i>	-1.00	<i>Tilt speed 2</i>	60%			Total	161.3363			
<i>casting mold</i>	Ingot					<b>STORAGE INFORMATION</b>				
<i>casting mode</i>	Manual					<b>CABINET NUMBER</b>				
<i>casting pressure start</i>	80°					<b>SHELF NUMBER</b>	17			
<i>casting pressure (bar)</i>	0.00					<b>CAST AMOUNT (g)</b>				
<i>vibration time (s)</i>	20					<b>REMAINING AMOUNT (g)</b>				
<i>cooling time (s)</i>	290									
<b>ADDITIONAL INFORMATION</b>										
<b>Holding time above 715°C</b>				8 min						
<b>Maximum temperatur reached (°C)</b>				745						
<b>Cast weight (gram)</b>				155.3199						
<b>Residue weight (gram)</b>				3.4547						
<b>Unmelt metal (gram)</b>										
<b>Element compensation (add to initial mass)</b>				Zn: 10%; Mg: 5%						

**PADUAN Al-2.9Zn-2.9Mg-1.0Cu (at. %)****CASTING DATA SHEET****Atomic weight of the elements (gram/mol)**

Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe
26.981	63.546	24.305	28.09	65.39	107.8682	118.71	72.61	55.845

<b>ALLOY CODE</b>		AZMC-672522/a/1 -25012011									
<b>NOMINAL COMPOSITION</b>											
	Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe	Σ	
wt%	88.59714	2.238979	2.48345		6.680435					100	
at%	93.20018	1.000039	2.900113	0	2.89967	0	0	0	0	100	
<b>ICP RESULTS</b>											
<b>ICP TEST DATE</b>		01-February-2011									
	Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe	Σ	
wt%	88.946	1.97051	2.424488	0.024516	6.897741				0.068768	100.332	
at%	93.56694	0.880125	2.831251	0.024771	2.993985	0	0	0	0.034951	100.332	
<b>CASTING INFORMATION</b>						<b>CHARGE MATERIAL INFORMATION</b>					
<b>CAST NUMBER</b>		1				<b>Expected Amount (g)</b>		160			
<b>CASTING DATE</b>		Jan. 25, 2011				Al	141.8266				
<b>PERSON/S INVOLVED</b>		AS, BG				Cu	3.5819				
<b>CASTING PARAMETERS</b>						Mg	4.1768				
<i>temperature (°C)</i>	705	<i>heating off angle</i>	0°			Zn	11.7574				
	(724)	<i>Tilt speed 0</i>	100%			Si					
<i>washing before heating</i>	0 x	<i>Tilt angle 1</i>	58°			Ag					
<i>washing while heating</i>	0 x	<i>Tilt speed 1</i>	60%			Sn					
<i>flask/ingot while heat</i>	No	<i>Tilt angle 2</i>	75°								
<i>melting pressure (bar)</i>	-1.00	<i>Tilt speed 2</i>	60%			Total	161.3427				
<i>casting mold</i>	Ingot					<b>STORAGE INFORMATION</b>					
<i>casting mode</i>	Manual					<b>CABINET NUMBER</b>					
<i>casting pressure start</i>	80°					<b>SHELF NUMBER</b>	18				
<i>casting pressure (bar)</i>	0.00					<b>CAST AMOUNT (g)</b>					
<i>vibration time (s)</i>	20					<b>REMAINING AMOUNT (g)</b>					
<i>cooling time (s)</i>	290										
<b>ADDITIONAL INFORMATION</b>											
<b>Holding time above 715°C</b>				8.5 min							
<b>Maximum temperatur reached (°C)</b>				738							
<b>Cast weight (gram)</b>				156.787							
<b>Residue weight (gram)</b>				3.1378							
<b>Unmelt metal (gram)</b>											
<b>Element compensation (add to initial mass)</b>				Zn: 10%; Mg: 5%							

**PADUAN Al-2.9Zn-2.9Mg-1.3Cu (at. %)****CASTING DATA SHEET****Atomic weight of the elements (gram/mol)**

Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe
26.981	63.546	24.305	28.09	65.39	107.8682	118.71	72.61	55.845

ALLOY CODE		AZMC-672529/a/1 -25012011								
NOMINAL COMPOSITION										
	Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe	Σ
wt%	87.97193	2.899466	2.473888		6.654714					100
at%	92.90017	1.300051	2.900113	0	2.899669	0	0	0	0	100
ICP RESULTS										
ICP TEST DATE		01-February-2011								
	Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe	Σ
wt%	89.09832	2.610334	2.43705	0.024307	7.226087				0.068565	101.4647
at%	94.2191	1.172021	2.860858	0.024689	3.152966	0	0	0	0.03503	101.4647
CASTING INFORMATION						CHARGE MATERIAL INFORMATION				
CAST NUMBER		1				Expected Amount (g)		160		
CASTING DATE		Jan. 25, 2011				Al	140.9122			
PERSON/S INVOLVED		AS, BG				Cu	4.6394			
CASTING PARAMETERS						Mg	4.1608			
<i>temperature (°C)</i>	705	<i>heating off angle</i>	0°			Zn	12.2446			
	(723)	<i>Tilt speed 0</i>	100%			Si				
<i>washing before heating</i>	0 x	<i>Tilt angle 1</i>	58°			Ag				
<i>washing while heating</i>	0 x	<i>Tilt speed 1</i>	60%			Sn				
<i>flask/ingot while heat</i>	No	<i>Tilt angle 2</i>	75°							
<i>melting pressure (bar)</i>	-1.00	<i>Tilt speed 2</i>	60%			Total	161.957			
<i>casting mold</i>	Ingot					STORAGE INFORMATION				
<i>casting mode</i>	Manual					CABINET NUMBER				
<i>casting pressure start</i>	80°					SHELF NUMBER	19			
<i>casting pressure (bar)</i>	0.00					CAST AMOUNT (g)				
<i>vibration time (s)</i>	20					REMAINING AMOUNT (g)				
<i>cooling time (s)</i>	290									
ADDITIONAL INFORMATION										
Holding time above 715°C		9 min								
Maximum temperatur reached (°C)		732								
Cast weight (gram)		156.4346								
Residue weight (gram)		4.1793								
Unmelt metal (gram)										
Element compensation (add to initial mass)		Zn: 15%; Mg: 5%								



**PADUAN Al-2.9Zn-2.9Mg-1.6Cu (at. %)****CASTING DATA SHEET****Atomic weight of the elements (gram/mol)**

Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe
26.981	63.546	24.305	28.09	65.39	107.8682	118.71	72.61	55.845

ALLOY CODE		AZMC-662536/a1 -25012011								
NOMINAL COMPOSITION										
	Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe	Σ
wt%	87.35152	3.554887	2.4644		6.62919					100
at%	92.60016	1.600062	2.900112	0	2.899669	0	0	0	0	100
ICP RESULTS										
ICP TEST DATE		01-February-2011								
	Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe	Σ
wt%	88.81691	2.963404	2.391015	0.024698	7.3768				0.069197	101.642
at%	94.20325	1.334538	2.815237	0.025161	3.228382	0	0	0	0.035459	101.642
CASTING INFORMATION						CHARGE MATERIAL INFORMATION				
CAST NUMBER		1				Expected Amount (g)		160		
CASTING DATE		Jan. 25, 2011				Al	139.7779			
PERSON/S INVOLVED		AS, BG				Cu	5.6876			
CASTING PARAMETERS						Mg	4.1449			
<i>temperature (°C)</i>	705	<i>heating off angle</i>	0°			Zn	12.197			
	(724)	<i>Tilt speed 0</i>	100%			Si				
<i>washing before heating</i>	0 x	<i>Tilt angle 1</i>	58°			Ag				
<i>washing while heating</i>	0 x	<i>Tilt speed 1</i>	60%			Sn				
<i>flask/ingot while heat</i>	No	<i>Tilt angle 2</i>	75°							
<i>melting pressure (bar)</i>	-1.00	<i>Tilt speed 2</i>	60%			Total	161.8074			
<i>casting mold</i>	Ingot					STORAGE INFORMATION				
<i>casting mode</i>	Manual					CABINET NUMBER				
<i>casting pressure start</i>	80°					SHELF NUMBER	20			
<i>casting pressure (bar)</i>	0.00					CAST AMOUNT (g)				
<i>vibration time (s)</i>	20					REMAINING AMOUNT (g)				
<i>cooling time (s)</i>	290									
ADDITIONAL INFORMATION										
Holding time above 715°C				10 min						
Maximum temperatur reached (°C)				735						
Cast weight (gram)				156.3604						
Residue weight (gram)				4.3195						
Unmelt metal (gram)										
Cu		0.3106								
Element compensation (add to initial mass)				Zn: 15%; Mg: 5%						

**PADUAN Al-1.7Zn-1.7Mg-1.0Cu/2 (at. %) (PENGECORAN KEDUA)****CASTING DATA SHEET****Atomic weight of the elements (gram/mol)**

Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe
26.981	63.546	24.305	28.09	65.39	107.8682	118.71	72.61	55.845

<b>ALLOY CODE</b>		AZMC-401523/a/2 -27012011								
<b>NOMINAL COMPOSITION</b>										
	Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe	Σ
wt%	92.27236	2.273317	1.478143		3.976176					100
at%	95.60009	1.000038	1.700065	0	1.699805	0	0	0	0	100
<b>ICP RESULTS</b>										
<b>ICP TEST DATE</b>		01-February-2011								
	Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe	Σ
wt%	93.43261	2.036117	1.452375	0.025124	4.219963				0.068917	101.2351
at%	96.80531	0.895722	1.670482	0.025003	1.804081	0	0	0	0.034499	101.2351
<b>CASTING INFORMATION</b>						<b>CHARGE MATERIAL INFORMATION</b>				
<b>CAST NUMBER</b>		1				<b>Expected Amount (g)</b>		160		
<b>CASTING DATE</b>		Jan. 27, 2011				Al	147.713			
<b>PERSON/S INVOLVED</b>		AS, BG				Cu	6.9971			
<b>CASTING PARAMETERS</b>						Mg	2.4851			
<i>temperature (°C)</i>	710	<i>heating off angle</i>	0°			Zn	3.6374			
	(727)	<i>Tilt speed 0</i>	100%			Si				
<i>washing before heating</i>	0 x	<i>Tilt angle 1</i>	58°			Ag				
<i>washing while heating</i>	0 x	<i>Tilt speed 1</i>	60%			Sn				
<i>flask/ingot while heat</i>	No	<i>Tilt angle 2</i>	75°							
<i>melting pressure (bar)</i>	-1.00	<i>Tilt speed 2</i>	60%			Total	160.8326			
<i>casting mold</i>	Ingot					<b>STORAGE INFORMATION</b>				
<i>casting mode</i>	Manual					<b>CABINET NUMBER</b>				
<i>casting pressure start</i>	80°					<b>SHELF NUMBER</b>	21			
<i>casting pressure (bar)</i>	0.00					<b>CAST AMOUNT (g)</b>				
<i>vibration time (s)</i>	20					<b>REMAINING AMOUNT (g)</b>				
<i>cooling time (s)</i>	290									
<b>ADDITIONAL INFORMATION</b>										
<b>Holding time above 720°C</b>				8 min						
<b>Maximum temperatur reached (°C)</b>				746						
<b>Cast weight (gram)</b>				156.4331						
<b>Residue weight (gram)</b>				3.7306						
<b>Unmelt metal (gram)</b>										
<b>Element compensation (add to initial mass)</b>				Zn: 10%; Mg: 5%						

**PADUAN Al-2.1Zn-2.1Mg-1.3Cu/2 (at. %) (PENGECORAN KEDUA)****CASTING DATA SHEET****Atomic weight of the elements (gram/mol)**

Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe
26.981	63.546	24.305	28.09	65.39	107.8682	118.71	72.61	55.845

<b>ALLOY CODE</b>		AZMC-491829/a/2 -27012011								
<b>NOMINAL COMPOSITION</b>										
	Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe	Σ
wt%	90.39381	2.928846	1.809589		4.86776					100
at%	94.50011	1.30005	2.10008	0	2.099759	0	0	0	0	100
<b>ICP RESULTS</b>										
<b>ICP TEST DATE</b>		01-February-2011								
	Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe	Σ
wt%	90.37254	2.598704	1.743635	0.025075	5.15761				0.070844	99.96841
at%	94.5041	1.153827	2.0241	0.025186	2.225407	0	0	0	0.035792	99.96841
<b>CASTING INFORMATION</b>						<b>CHARGE MATERIAL INFORMATION</b>				
<b>CAST NUMBER</b>		1				<b>Expected Amount (g)</b>		160		
<b>CASTING DATE</b>		Jan. 27, 2011				Al	144.6744			
<b>PERSON/S INVOLVED</b>		AS, BG				Cu	8.9565			
<b>CASTING PARAMETERS</b>						Mg	3.043			
<i>temperature (°C)</i>	710	<i>heating off angle</i>	0°			Zn	4.6862			
	(726)	<i>Tilt speed 0</i>	100%			Si				
<i>washing before heating</i>	0 x	<i>Tilt angle 1</i>	58°			Ag				
<i>washing while heating</i>	0 x	<i>Tilt speed 1</i>	60%			Sn				
<i>flask/ingot while heat</i>	No	<i>Tilt angle 2</i>	75°							
<i>melting pressure (bar)</i>	-1.00	<i>Tilt speed 2</i>	60%			Total	161.3601			
<i>casting mold</i>	Ingot					<b>STORAGE INFORMATION</b>				
<i>casting mode</i>	Manual					<b>CABINET NUMBER</b>				
<i>casting pressure start</i>	80°					<b>SHELF NUMBER</b>	22			
<i>casting pressure (bar)</i>	0.00					<b>CAST AMOUNT (g)</b>				
<i>vibration time (s)</i>	20					<b>REMAINING AMOUNT (g)</b>				
<i>cooling time (s)</i>	290									
<b>ADDITIONAL INFORMATION</b>										
<b>Holding time above 720°C</b>				9 min						
<b>Maximum temperatur reached (°C)</b>				746						
<b>Cast weight (gram)</b>				155.745						
<b>Residue weight (gram)</b>				4.2741						
<b>Unmelt metal (gram)</b>										
<b>Element compensation (add to initial mass)</b>				Zn: 15%; Mg: 5%						

**PADUAN Al-2.9Zn-2.9Mg-1.6Cu/2 (at. %) (PENGECORAN KEDUA)****CASTING DATA SHEET**

Atomic weight of the elements (gram/mol)

Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe
26.981	63.546	24.305	28.09	65.39	107.8682	118.71	72.61	55.845

ALLOY CODE		AZMC-662536/a/2 -27012011								
NOMINAL COMPOSITION										
	Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe	Σ
wt%	87.35152	3.554887	2.4644		6.62919					100
at%	92.60016	1.600062	2.900112	0	2.899669	0	0	0	0	100
ICP RESULTS										
ICP TEST DATE		01-February-2011								
	Al	Cu	Mg	Si	Zn	Ag	Sn	Ge	Fe	Σ
wt%	87.72214	3.177105	2.387392	0.024472	7.001056				0.070714	100.3829
at%	93.01793	1.430405	2.810241	0.024925	3.063146	0	0	0	0.036227	100.3829
CASTING INFORMATION						CHARGE MATERIAL INFORMATION				
CAST NUMBER		1				Expected Amount (g)		160		
CASTING DATE		Jan. 27, 2011				Al	139.797			
PERSON/S INVOLVED		AS, BG				Cu	12.1945			
CASTING PARAMETERS						Mg	4.1444			
<i>temperature (°C)</i>	710	<i>heating off angle</i>	0°			Zn	5.6876			
	(731)	<i>Tilt speed 0</i>	100%			Si				
<i>washing before heating</i>	0 x	<i>Tilt angle 1</i>	58°			Ag				
<i>washing while heating</i>	0 x	<i>Tilt speed 1</i>	60%			Sn				
<i>flask/ingot while heat</i>	No	<i>Tilt angle 2</i>	75°							
<i>melting pressure (bar)</i>	-1.00	<i>Tilt speed 2</i>	60%			Total	161.8235			
<i>casting mold</i>	Ingot					STORAGE INFORMATION				
<i>casting mode</i>	Manual					CABINET NUMBER				
<i>casting pressure start</i>	80°					SHELF NUMBER	23			
<i>casting pressure (bar)</i>	0.00					CAST AMOUNT (g)				
<i>vibration time (s)</i>	20					REMAINING AMOUNT (g)				
<i>cooling time (s)</i>	290									
ADDITIONAL INFORMATION										
Holding time above 720°C				11 min						
Maximum temperatur reached (°C)				737						
Cast weight (gram)				156.2688						
Residue weight (gram)				4.2556						
Unmelt metal (gram)										
Element compensation (add to initial mass)				Zn: 15%; Mg: 5%						



## LAMPIRAN 4. KUPON PARAMETER PENGECORAN PADUAN Al-Zn-Mg-Cu

### PADUAN Al-1.7Zn-1.7Mg-0.4Cu; Al-1.7Zn-1.7Mg-0.7Cu DAN Al-1.7Zn-1.7Mg-1.0Cu (at. %)

INDUTHERM	INDUTHERM	INDUTHERM
Material : Al-4.00% Zn - 1.4898 Mg - 0.3165 Cu.	Material : Al-3.992 Zn - 1.984 Mg - 0.5876 Cu.	Material : Al-3.976 Zn - 1.978 Mg - 2.27 Cu (wt %)
Quantity : 160	Quantity : 160 grams	Quantity : 160 gr
Batch : 1	Batch : 1	Batch : 1
Date : 22 11 2010 02:25:11	Date : 22 11 2010 06:50:46	Date : 24 11 2010 00:22:04
Program : P000 InduTest	Program : P000 InduTest	Program : P000 InduTest
Temperature : 715 °C → 713 °C	Temperature : 725 °C ( 725 °C )	Temperature : 727 °C ( 729 °C )
Washing before heating : 0 x	Washing before heating : 0 x	Washing before heating : 0 x
Washing while heating : 0 x	Washing while heating : 0 x	Washing while heating : 0 x
Flask/Ingot white heat : No	Flask/Ingot white heat : No	Flask/Ingot white heat : No
Melting pressure : -1 00 bar (-1 00 bar)	Melting pressure : -1 00 bar (-1 00 bar)	Melting pressure : -1 00 bar (-1 00 bar)
Casting mould : Ingot	Casting mould : Ingot	Casting mould : Ingot
Casting mode : Manual	Casting mode : Manual	Casting mode : Manual
Casting pressure start : 80 °	Casting pressure start : 80 °	Casting pressure start : 80 °
Casting pressure : 0 00 bar ( 0 00 bar )	Casting pressure : 0 00 bar ( 0 00 bar )	Casting pressure : 0 00 bar ( 0 00 bar )
Vibration time : 10 s	Vibration time : 15 s	Vibration time : 20 s
Cooling time : 290 s ( 290 s )	Cooling time : 290 s ( 290 s )	Cooling time : 290 s ( 290 s )
Heating off angle : 0 °	Heating off angle : 0 °	Heating off angle : 0 °
Tilt speed 0 : 100 %	Tilt speed 0 : 100 %	Tilt speed 0 : 100 %
Tilt angle 1 : 58 °	Tilt angle 1 : 58 °	Tilt angle 1 : 58 °
Tilt speed 1 : 60 %	Tilt speed 1 : 60 %	Tilt speed 1 : 60 %
Tilt angle 2 : 75 °	Tilt angle 2 : 75 °	Tilt angle 2 : 75 °
Tilt speed 2 : 60 %	Tilt speed 2 : 60 %	Tilt speed 2 : 60 %
Current values within brackets	Current values within brackets	Current values within brackets
VTC200V 800 0017 F0030 M10179	VTC200V 800 0017 F0030 M10179	VTC200V 800 0017 F0030 M10179
Cast wt : 159.2730	Cast wt : 155.4368	Cast wt = 153.2955 gr
Residue wt : 5.4165	Residue wt : 4.2289	Residue wt = 6.0925 gr
Time above 715 : 7 min	Time above 725 : 6 min	generator = 9 kW max T = 780 °C



**PADUAN Al-1.7Zn-1.7Mg-1.0Cu/2; Al-1.7Zn-1.7Mg-1.3Cu DAN Al-1.7Zn-1.7Mg-1.6Cu**

INDUTHERM	INDUTHERM	INDUTHERM
Material : <b>A2MC-401523 la/2</b>	Material : <b>Al-3.95Zn-1.97Mg-2.34Cu</b>	Material : <b>Al-3.95Zn-1.9668Mg</b>
Quantity : <b>160 gr</b>	Quantity : <b>160 gram</b>	Quantity : <b>3.6089 Cu</b>
Batch : <b>2</b>	Batch : <b>1</b>	Batch : <b>1</b>
Date : 27 01 2011 01:49:00	Date : 24 11 2010 01:42:51	Date : 26 11 2010 06:43:49
Program : P000 InduTest	Program : P000 InduTest	Program : P000 InduTest
Temperature 710 °C ( 727 °C )	Temperature 727 °C ( 764 °C )	Temperature 720 °C ( 749 °C )
Washing before heating 0 x	Washing before heating 0 x	Washing before heating 0 x
Washing while heating 0 x	Washing while heating 0 x	Washing while heating 0 x
Flask/Ingot while heat No	Flask/Ingot while heat No	Flask/Ingot while heat No
Melting pressure -1.00 bar (-1.00 bar)	Melting pressure -1.00 bar (-1.00 bar)	Melting pressure -1.00 bar (-1.00 bar)
Casting mould Ingot	Casting mould Ingot	Casting mould Ingot
Casting mode Manual	Casting mode Manual	Casting mode Manual
Casting pressure start 80 °	Casting pressure start 80 °	Casting pressure start 80 °
Casting pressure 0.00 bar ( 0.00 bar )	Casting pressure 0.00 bar ( 0.00 bar )	Casting pressure 0.00 bar ( 0.00 bar )
Vibration time 20 s	Vibration time 20 s	Vibration time 20 s
Cooling time 290 s ( 290 s )	Cooling time 290 s ( 290 s )	Cooling time 290 s ( 290 s )
Heating off angle 0 °	Heating off angle 0 °	Heating off angle 0 °
Tilt speed 0 100 %	Tilt speed 0 100 %	Tilt speed 0 100 %
Tilt angle 1 58 °	Tilt angle 1 58 °	Tilt angle 1 58 °
Tilt speed 1 60 %	Tilt speed 1 60 %	Tilt speed 1 60 %
Tilt angle 2 75 °	Tilt angle 2 75 °	Tilt angle 2 75 °
Tilt speed 2 60 %	Tilt speed 2 60 %	Tilt speed 2 60 %
Current values within brackets VTC200V 800 0017 F0030 M10179	Current values within brackets VTC200V 800 0017 F0030 M10179	Current values within brackets VTC200V 800 0017 F0030 M10179
max T : <b>746 °C</b>	cast wt : <b>152.2469 gr</b>	Cast weight : <b>155.7402 gr</b>
cast wt : <b>156.4331 gr</b>	residue wt : <b>6.5189 gr</b>	residue wt : <b>3.5563 gr</b>
residue wt : <b>3.7306 gr</b>	generator = <b>9 kW</b>	max T : <b>753 °C</b>

**PADUAN Al-2.1Zn-2.1Mg-0.4Cu; Al-2.1Zn-2.1Mg-0.7Cu DAN Al-2.1Zn-2.1Mg-1.0Cu**

INDUTHERM	INDUTHERM	INDUTHERM
Material : <b>Al-4.925 Zn -1.831 Mg - 0.912 Cu</b>	Material : <b>Al-4.906 Zn - 1.824 Mg - 0.589 Cu (wt-%)</b>	Material : <b>Al-4.887 Zn -1.817 Mg - 2.262 Cu</b>
Quantity : 1	Quantity : 1	Quantity : 1
Batch : 1	Batch : 1	Batch : 1
Date : 26.11.2010 07:48:58	Date : 30.11.2010 00:24:50	Date : 30.11.2010 01:34:34
Program : P000 InduTest	Program : P000 InduTest	Program : P000 InduTest
Temperature 720 °C ( 753 °C )	Temperature <b>SET</b> → 720 °C <b>ACTUAL TEMP</b> → ( 757 °C )	Temperature 720 °C ( 757 °C )
Washing before heating 0 x	Washing before heating 0 x	Washing before heating 0 x
Washing while heating 0 x	Washing while heating 0 x	Washing while heating 0 x
Flask/Ingot while heat No	Flask/Ingot while heat No	Flask/Ingot while heat No
Melting pressure -1.00 bar (-1.00 bar)	Melting pressure -1.00 bar (-1.00 bar)	Melting pressure -1.00 bar (-1.00 bar)
Casting mould Ingot	Casting mould Ingot	Casting mould Ingot
Casting mode Manual	Casting mode Manual	Casting mode Manual
Casting pressure start 80 °	Casting pressure start 80 °	Casting pressure start 80 °
Casting pressure 0.00 bar ( 0.00 bar)	Casting pressure 0.00 bar ( 0.00 bar)	Casting pressure 0.00 bar ( 0.00 bar)
Vibration time 22 s	Vibration time 15 s	Vibration time 15 s
Cooling time 290 s ( 290 s )	Cooling time 285 s ( 285 s )	Cooling time 285 s ( 285 s )
Heating off angle 0 °	Heating off angle 0 °	Heating off angle 0 °
Tilt speed 0 100 %	Tilt speed 0 100 %	Tilt speed 0 100 %
Tilt angle 1 58 °	Tilt angle 1 58 °	Tilt angle 1 58 °
Tilt speed 1 60 %	Tilt speed 1 60 %	Tilt speed 1 60 %
Tilt angle 2 75 °	Tilt angle 2 75 °	Tilt angle 2 75 °
Tilt speed 2 60 %	Tilt speed 2 60 %	Tilt speed 2 60 %
Current values within brackets	Current values within brackets	Current values within brackets
VTC200V 800 0017 F0030 M10179	VTC200V 800 0017 F0030 M10179	VTC200V 800 0017 F0030 M10179
Cast wt = 154.6917 gr Residue wt = 4.3506 gr max T = 823 °C	Cast wt = 155.5088 gr Residue wt = 3.3778 gr max T = 765 °C	Cast wt = 155.7180 gr Residue wt = 3.2446 gr max T = 764 °C

**PADUAN Al-2.1Zn-2.1Mg-1.3Cu; Al-2.1Zn-2.1Mg-1.3Cu/2 DAN Al-2.1Zn-2.1Mg-1.6Cu**

*Wmelt Cu = 0.3722 gr*

INDUTHERM

*Al-4.868 Zn-1.809Mg-*

Material : *2.929 Cu* *wt. 4?*

Quantity : 1

Batch : 1

Date : 01.12.2010 01:09:00

Program : P000 InduTest

Temperature 720 °C  
( 751 °C )  
Washing before heating 0 x  
Washing while heating 0 x  
Flask/Ingot while heat No  
Melting pressure -1.00 bar  
(-1.00 bar)  
Casting mould Ingot  
Casting mode Manual  
Casting pressure start 80 °  
Casting pressure 0.00 bar  
( 0.00 bar )  
Vibration time 15 s  
Cooling time 285 s  
( 285 s )  
Heating off angle 0 °  
Tilt speed 0 100 %  
Tilt angle 1 58 °  
Tilt speed 1 60 %  
Tilt angle 2 75 °  
Tilt speed 2 60 %

Current values within brackets.

VTC200V 800 0017 F0030 M10179

*cast wt : 154.5276 gr*  
*residue wt : 4.3758 gr*  
*Max T : 768 °C*

INDUTHERM

Material : *A2MC-491829/a/2*

Quantity : *160 gr*

Batch : *2*

Date : 27.01.2011 03:06:57

Program : P000 InduTest

Temperature 710 °C  
( 726 °C )  
Washing before heating 0 x  
Washing while heating 0 x  
Flask/Ingot while heat No  
Melting pressure -1.00 bar  
(-1.00 bar)  
Casting mould Ingot  
Casting mode Manual  
Casting pressure start 80 °  
Casting pressure 0.00 bar  
( 0.00 bar )  
Vibration time 20 s  
Cooling time 290 s  
( 290 s )  
Heating off angle 0 °  
Tilt speed 0 100 %  
Tilt angle 1 58 °  
Tilt speed 1 60 %  
Tilt angle 2 75 °  
Tilt speed 2 60 %

Current values within brackets.

VTC200V 800 0017 F0030 M10179

*max T = 742*  
*cast wt : 155.7450 gr*  
*residue : 4.2791 gr*

INDUTHERM

*Al-4.849 Zn-1.803Mg-*

Material : *3.591 Cu*

Quantity : 1

Batch : 1

Date : 01.12.2010 02:32:19

Program : P000 InduTest

Temperature 720 °C  
( 754 °C )  
Washing before heating 0 x  
Washing while heating 0 x  
Flask/Ingot while heat No  
Melting pressure -1.00 bar  
(-1.00 bar)  
Casting mould Ingot  
Casting mode Manual  
Casting pressure start 80 °  
Casting pressure 0.00 bar  
( 0.00 bar )  
Vibration time 20 s  
Cooling time 290 s  
( 290 s )  
Heating off angle 0 °  
Tilt speed 0 100 %  
Tilt angle 1 58 °  
Tilt speed 1 60 %  
Tilt angle 2 75 °  
Tilt speed 2 60 %

Current values within brackets.

VTC200V 800 0017 F0030 M10179

*cast wt : 155.5558 gr*  
*residue wt : 3.6175 gr*  
*max T : 772 °C*



**PADUAN Al-2.5Zn-2.5Mg-0.4Cu; Al-2.5Zn-2.5Mg-0.7Cu DAN Al-2.5Zn-2.5Mg-1.0Cu**

max T = 766°C

INDUTHERM

Material : Al - 5.8332g Zn - 2.1691mg -  
0.907Cu

Quantity : 1

Batch : 1

Date : 01.12.2010 09:02:08

Program : P000 InduTest

Temperature 715 °C  
( 755 °C )

Washing before heating 0 x  
Washing while heating 0 x  
Flask/Ingot while heat No  
Melting pressure -1.00 bar  
(-1.00 bar)

Casting mould Ingot  
Casting mode Manual  
Casting pressure start 80 °  
Casting pressure 0.00 bar  
( 0.00 bar )

Vibration time 20 s  
Cooling time 290 s  
( 290 s )

Heating off angle 0 °  
Tilt speed 0 100 %  
Tilt angle 1 58 °  
Tilt speed 1 60 %  
Tilt angle 2 75 °  
Tilt speed 2 60 %

Current values within brackets.

VTC200V 800 0017 F0030 M10179  
cast wt = 154.6586 gr  
residue wt = 9.3937 gr

INDUTHERM

Material : Al - 5.8142g Zn - 2.1601mg -  
1.5886Cu (wt 6)

Quantity : 1

Batch : 1

Date : 01.12.2010 10:03:41

Program : P000 InduTest

Temperature 715 °C  
( 756 °C )

Washing before heating 0 x  
Washing while heating 0 x  
Flask/Ingot while heat No  
Melting pressure -1.00 bar  
(-1.00 bar)

Casting mould Ingot  
Casting mode Manual  
Casting pressure start 80 °  
Casting pressure 0.00 bar  
( 0.00 bar )

Vibration time 20 s  
Cooling time 290 s  
( 290 s )

Heating off angle 0 °  
Tilt speed 0 100 %  
Tilt angle 1 58 °  
Tilt speed 1 60 %  
Tilt angle 2 75 °  
Tilt speed 2 60 %

Current values within brackets.

VTC200V 800 0017 F0030 M10179  
cast wt : 155.1561 gr  
residue wt : 9.4570 gr  
max T : 763°C

INDUTHERM

Material : AZMg-582223/a/1

Quantity : 160 gr

Batch : 1

Date : 25.01.2011 01:01:14

Program : P000 InduTest

Temperature 705 °C  
( 723 °C )

Washing before heating 0 x  
Washing while heating 0 x  
Flask/Ingot while heat No  
Melting pressure -1.00 bar  
(-1.00 bar)

Casting mould Ingot  
Casting mode Manual  
Casting pressure start 80 °  
Casting pressure 0.00 bar  
( 0.00 bar )

Vibration time 20 s  
Cooling time 290 s  
( 290 s )

Heating off angle 0 °  
Tilt speed 0 100 %  
Tilt angle 1 58 °  
Tilt speed 1 60 %  
Tilt angle 2 75 °  
Tilt speed 2 60 %

Current values within brackets.

VTC200V 800 0017 F0030 M10179  
max T : 755°C  
cast wt : 155.3802 gr  
residue wt : 9.6308 gr

**PADUAN Al-2.5Zn-2.5Mg-1.3Cu; Al-2.5Zn-2.5Mg-1.6Cu DAN Al-2.9Zn-2.9Mg-0.4Cu**

INDUTHERM	INDUTHERM	INDUTHERM
Material : <del>AZMC-52129/a/1</del>	Material : AZMC-52129/a/1	Material : AZMC-671509/a/1
Quantity : 160 gr	Quantity : 160 gr	Quantity : 160 gr
Batch : 1	Batch : 1	Batch : 1
Date : 25.01.2011 02:32:58	Date : 25.01.2011 04:21:11	Date : 25.01.2011 06:41:12
Program : P000 InduTest	Program : P000 InduTest	Program : P000 InduTest
Temperature 705 °C ( 724 °C )	Temperature 705 °C ( 723 °C )	Temperature 705 °C ( 724 °C )
Washing before heating 0 x	Washing before heating 0 x	Washing before heating 0 x
Washing while heating 0 x	Washing while heating 0 x	Washing while heating 0 x
Flask/ingot while heat No	Flask/ingot while heat No	Flask/ingot while heat No
Melting pressure -1.00 bar (-1.00 bar)	Melting pressure -1.00 bar (-1.00 bar)	Melting pressure -1.00 bar (-1.00 bar)
Casting mould Ingot	Casting mould Ingot	Casting mould Ingot
Casting mode Manual	Casting mode Manual	Casting mode Manual
Casting pressure start 80 °	Casting pressure start 80 °	Casting pressure start 80 °
Casting pressure 0.00 bar ( 0.00 bar )	Casting pressure 0.00 bar ( 0.00 bar )	Casting pressure 0.00 bar ( 0.00 bar )
Vibration time 20 s	Vibration time 20 s	Vibration time 20 s
Cooling time 290 s ( 290 s )	Cooling time 290 s ( 290 s )	Cooling time 290 s ( 290 s )
Heating off angle 0 °	Heating off angle 0 °	Heating off angle 0 °
Tilt speed 0 100 %	Tilt speed 0 100 %	Tilt speed 0 100 %
Tilt angle 1 58 °	Tilt angle 1 58 °	Tilt angle 1 58 °
Tilt speed 1 60 %	Tilt speed 1 60 %	Tilt speed 1 60 %
Tilt angle 2 75 °	Tilt angle 2 75 °	Tilt angle 2 75 °
Tilt speed 2 60 %	Tilt speed 2 60 %	Tilt speed 2 60 %
Current values within brackets.	Current values within brackets.	Current values within brackets.
VTC200V 800 0017 F0030 M10179	VTC200V 800 0017 F0030 M10179	VTC200V 800 0017 F0030 M10179
Max T = 752 °C cast wt : 156.5829 gr residue wt : 4.2143 gr	Max T = 743 °C cast wt : 156.6173 gr residue wt : 4.1264 gr	Max T = 736 °C cast wt : 155.9440 gr residue wt : 4.2165 gr



**PADUAN Al-2.9Zn-2.9Mg-0.7Cu; Al-2.4Zn-2.4Mg-1.0Cu DAN Al-2.9Zn-2.9Mg-1.3Cu**

INDUTHERM		INDUTHERM		INDUTHERM	
Material :	AZMC-672516 (a/1)	Material :	AZMC-672522 (a/1)	Material :	AZMC-672529 (a/1)
Quantity :	160 gr	Quantity :	160 gr	Quantity :	160 gr
Batch :	1	Batch :	1	Batch :	1
Date :	25 01 2011 07:47:33	Date :	25 01 2011 08:56:42	Date :	25 01 2011 10:24:11
max T :	795°C				
Program :	P000 InduTest	Program :	P000 InduTest	Program :	P000 InduTest
Temperature	705 °C ( 728 °C )	Temperature	705 °C ( 724 °C )	Temperature	705 °C ( 723 °C )
Washing before heating	0 x	Washing before heating	0 x	Washing before heating	0 x
Washing while heating	0 x	Washing while heating	0 x	Washing while heating	0 x
Flask/Ingot while heat	No	Flask/Ingot while heat	No	Flask/Ingot while heat	No
Melting pressure	-1.00 bar (-1.00 bar)	Melting pressure	-1.00 bar (-1.00 bar)	Melting pressure	-1.00 bar (-1.00 bar)
Casting mould	Ingot	Casting mould	Ingot	Casting mould	Ingot
Casting mode	Manual	Casting mode	Manual	Casting mode	Manual
Casting pressure start	80 °	Casting pressure start	80 °	Casting pressure start	80 °
Casting pressure	0.00 bar ( 0.00 bar )	Casting pressure	0.00 bar ( 0.00 bar )	Casting pressure	0.00 bar ( 0.00 bar )
Vibration time	20 s	Vibration time	20 s	Vibration time	20 s
Cooling time	290 s ( 290 s )	Cooling time	290 s ( 290 s )	Cooling time	290 s ( 290 s )
Heating off angle	0 °	Heating off angle	0 °	Heating off angle	0 °
Tilt speed 0	100 %	Tilt speed 0	100 %	Tilt speed 0	100 %
Tilt angle 1	58 °	Tilt angle 1	58 °	Tilt angle 1	58 °
Tilt speed 1	60 %	Tilt speed 1	60 %	Tilt speed 1	60 %
Tilt angle 2	75 °	Tilt angle 2	75 °	Tilt angle 2	75 °
Tilt speed 2	60 %	Tilt speed 2	60 %	Tilt speed 2	60 %
Current values within brackets.		Current values within brackets.		Current values within brackets.	
VTC200V 800 0017 F0030 M10179		VTC200V 800 0017 F0030 M10179		VTC200V 800 0017 F0030 M10179	
cast wt : 157.9199 gr		max T = 738°C		max T = 732°C	
residue wt : 3.4547 gr		cast wt : 156.7070 gr		cast wt : 156.4346 gr	
		residue wt : 3.1378 gr		residue wt : 4.1793 gr	

**PADUAN Al-2.9Zn-2.9Mg-1.6Cu DAN Al-2.9Zn-2.9Mg-1.6Cu/2 (at. %)**

INDUTHERM

Material : *A2MC-662536/a/1*  
 Quantity : *160 gr*  
 Batch : *1*  
 Date : *25.01.2011 11:27:09*

Program : P000 InduTest

Temperature 705 °C  
 ( 724 °C )  
 Washing before heating 0 x  
 Washing while heating 0 x  
 Flask/Ingot while heat No  
 Melting pressure -1.00 bar  
 (-1.00 bar)  
 Casting mould Ingot  
 Casting mode Manual  
 Casting pressure start 80 °  
 Casting pressure 0.00 bar  
 ( 0.00 bar )  
 Vibration time 20 s  
 Cooling time 290 s  
 ( 290 s )  
 Heating off angle 0 °  
 Tilt speed 0 100 %  
 Tilt angle 1 58 °  
 Tilt speed 1 60 %  
 Tilt angle 2 75 °  
 Tilt speed 2 60 %

Current values within brackets.

VTC200V 800 0017 F0030 M10179

*max T : 735 °C* *unsolve at: 0.3106 gr*  
*cast wt : 156.304 gr*  
*residue wt = 4.3195 gr*

INDUTHERM

Material : *A2MC-662536/a/2*  
 Quantity : *160 gr*  
 Batch : *2*  
 Date : *27.01.2011 00:51:35*

Program : P000 InduTest

Temperature 710 °C  
 ( 731 °C )  
 Washing before heating 0 x  
 Washing while heating 0 x  
 Flask/Ingot while heat No  
 Melting pressure -1.00 bar  
 (-1.00 bar)  
 Casting mould Ingot  
 Casting mode Manual  
 Casting pressure start 80 °  
 Casting pressure 0.00 bar  
 ( 0.00 bar )  
 Vibration time 20 s  
 Cooling time 290 s  
 ( 290 s )  
 Heating off angle 0 °  
 Tilt speed 0 100 %  
 Tilt angle 1 58 °  
 Tilt speed 1 60 %  
 Tilt angle 2 75 °  
 Tilt speed 2 60 %

Current values within brackets.

VTC200V 800 0017 F0030 M10179

*max T = 737 °C*  
*cast wt :*  
*residue wt :*

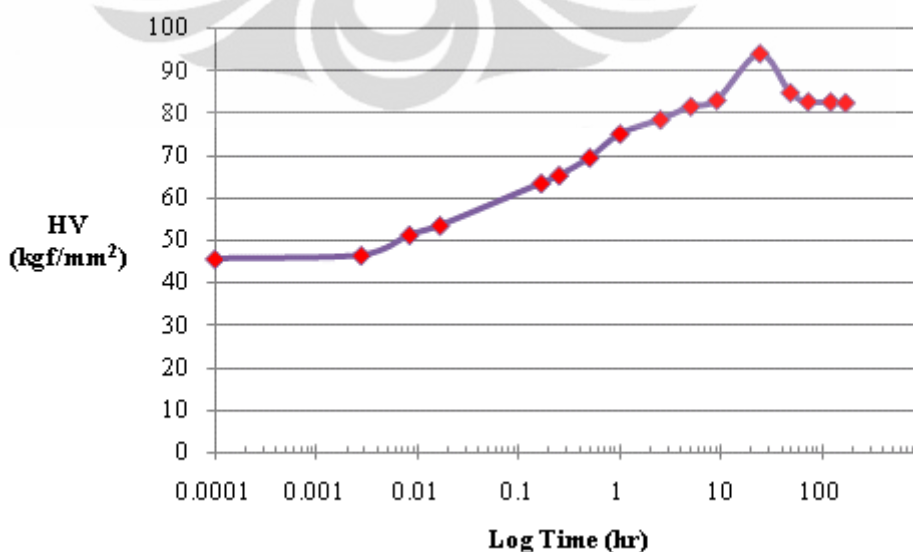
## LAMPIRAN 5. DATA PENGUJIAN KEKERASAN PADUAN Al-Zn-Mg-Cu SELAMA AGEING PADA TEMPERATUR 120 °C DAN 190 °C

### PADUAN Al-1.7Zn-1.7Mg-0.4Cu (at. %) SELAMA AGEING PADA TEMPERATUR 120 °C

Date of Heat treatment : 8/02/2011  
 Solution Treatment : 470°C (90 min on Salt Bath)  
 Ageing Temperature : 120°C (Oil Bath)  
 Load : 3 kgf, dwell time 10 s

Sample No.	Ageing Treatment (min)	Vickers Hardness Value								Average
		1	2	3	4	5	6	7	8	
1	0	45.8	45.8	43.8	46.4	46.7	44.9	45.6	45.1	45.5125
2	0.16666667	45.3	44.5	45.8	47.9	46.5	45.3	46.5	49.2	46.375
3	0.5	52.6	51.1	49.5	50.6	51.3	51.4	51.7	51.2	51.175
4	1	53.6	57.6	52.4	52	53.9	55	50.6	52.1	53.4
5	10	65	60.6	63.7	62.7	66	63.1	65.3	60.6	63.375
6	15	65.5	67	64.1	65.2	64.8	66.8	62.7	65.6	65.2125
7	30	73.7	73.2	66.6	64.3	68.8	70.3	67.3	71	69.4
8	60	78.9	72.3	79.3	78	77.1	72.4	68.7	73.6	75.0375
9	150	78.2	80	76.1	77.3	81.7	78.4	81.2	74.3	78.4
10	300	81.1	80.4	80.2	80.4	83.9	82	81.2	82.8	81.5
11	540	84.4	86.9	84.8	80.5	82.6	79.9	80.8	83.7	82.95
12	1440	90.1	95.4	87.4	91.3	95.7	94.2	99.8	97.5	93.925
13	2880	86.9	78	82.7	80.8	84.9	88.3	90.3	86	84.7375
14	4320	79.7	81.4	81.3	83.8	84.1	82.4	84.6	83.5	82.6
15	7200	81.3	82.4	84.7	82.2	83.4	83.9	81.3	81.3	82.5625
16	10080	82	79.8	85.5	85.5	82.5	80.9	81.3	81.3	82.35

Hardness Curve Al-1.7Zn-1.7Mg-0.4Cu (at. %) after Ageing at 120 °C

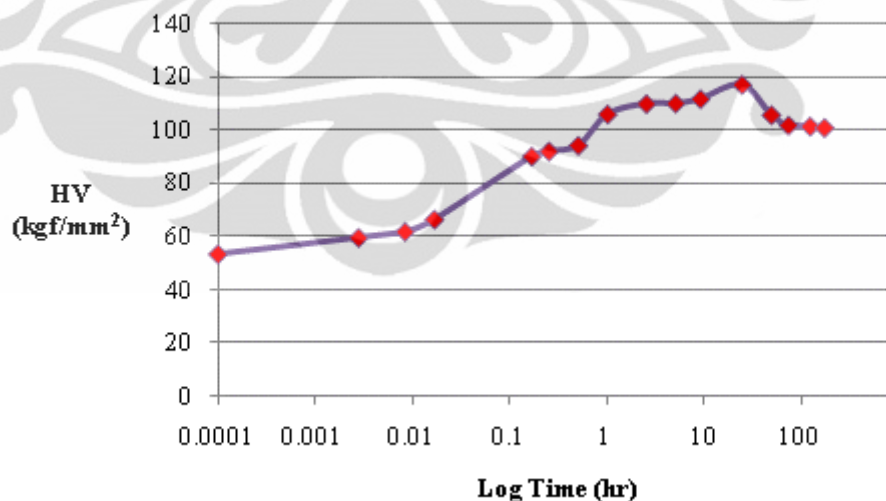


**PADUAN Al-1.7Zn-1.7Mg-0.7Cu (at. %) SELAMA AGEING PADA  
TEMPERATUR 120 °C**

Date of Heat treatment : 9/02/2011  
 Solution Treatment : 470°C (90 min on Salt Bath)  
 Ageing Temperature : 120°C (Oil Bath)  
 Load : 3 kgf, dwell time 10 s

Sample No.	Ageing Treatment (min)	Vickers Hardness Value								Average
		1	2	3	4	5	6	7	8	
1	0	54.4	53.7	54	52.3	55.6	52.9	52.8	53.4	53.6375
2	0.166666667	60.5	58	61.3	62.6	61.6	57.5	57.9	58.9	59.7875
3	0.5	62.6	59.8	62.4	59.7	60.8	62.7	64.4	63.8	62.025
4	1	67.3	68.6	66.5	66.2	65.2	67.1	65.1	66.9	66.6125
5	10	91	94.9	89	87.8	91	89.2	89.9	88.3	90.1375
6	15	93.9	95	90.6	91.7	91.2	90.2	92.8	90.5	91.9875
7	30	93.3	91.9	94	95.5	92.6	91.2	96.8	98	94.1625
8	60	106.2	115.9	102.9	106.7	104.5	102.9	104.1	103.6	105.85
9	150	101.9	111.2	114.7	123.3	109.7	113.2	101.7	102.2	109.7375
10	300	107.3	113.5	109.5	106.9	110.7	108.2	112.1	110.9	109.8875
11	540	114.9	111	107.8	115.3	103.4	113.7	108.8	117.4	111.5375
12	1440	117.7	113.4	113.4	117.9	115.8	114.4	123	119.5	116.8875
13	2880	98.2	105.3	102.8	101.1	104.8	107.7	115.6	109	105.5625
14	4320	106.8	101.3	101.8	103.8	102.6	100.1	98.7	98.3	101.675
15	7200	100.7	104.5	100.9	102.3	101.1	99.5	100.3	101.2	101.3125
16	10080	101.2	101.7	101.3	101.4	99.6	99.1	101.8	100.4	100.8125

**Hardness Curve Al-1.7Zn-1.7Mg-0.7Cu (at. %) after Ageing at 120 °C**



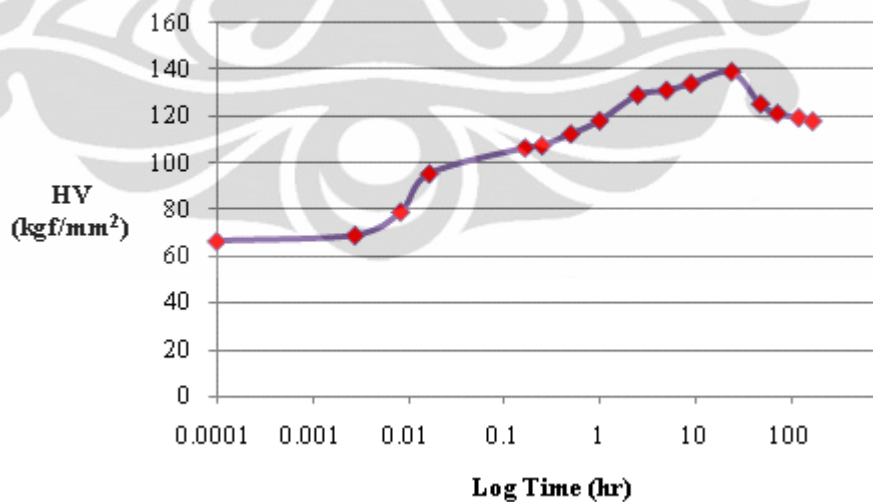


**PADUAN Al-1.7Zn-1.7Mg-1.0Cu/2 (at. %) SELAMA AGEING PADA  
TEMPERATUR 120 °C**

Date of Heat treatment : 12/02/2011  
 Solution Treatment : 470°C (90 min on Salt Bath)  
 Ageing Temperature : 120°C (Oil Bath)  
 Load : 3 kgf, dwell time 10 s

Sample No.	Ageing Treatment (min)	Vickers Hardness Value								
		1	2	3	4	5	6	7	8	Average
1	0	68.7	67.8	68.8	64.7	63.7	64.8	65.8	66.2	66.3125
2	0.166666667	68.4	68.8	67.9	68.9	69.8	68.3	68.7	69.8	68.825
3	0.5	78.7	80.2	77.2	78.2	78.5	78.1	79.9	80.5	78.9125
4	1	96.9	98.7	94.1	94.9	96.5	93	91.9	97.4	95.425
5	10	104.2	109.5	113.1	114.6	100.2	103	105	103.1	106.5875
6	15	111.7	107.7	105.9	99.9	105	110	114.2	106.5	107.6125
7	30	116.7	118	110.6	110.8	118.7	107.4	111.4	107.2	112.6
8	60	128.1	128.4	116.4	110.1	117.5	118.1	119.4	108.4	118.3
9	150	137.2	141.3	128.9	130.3	126.9	123.4	124.3	123	129.4125
10	300	134	137	133.2	131.5	133.4	127	126.7	128	131.35
11	540	136.9	131.2	132.2	137.9	132.9	134.7	130.7	138.3	134.35
12	1440	136.6	138.7	140.1	136.1	139.3	138.5	138.1	147.9	139.4125
13	2880	124.7	127.7	126	132.4	116	126.5	125.3	125.8	125.55
14	4320	120.4	123	120.8	122.2	119.8	122.6	120.5	121.6	121.3625
15	7200	116.8	120.3	120.7	117.2	120.7	119	119.8	122.3	119.6
16	10080	118.9	119.2	116.7	117	118.7	118.6	117.6	118.2	118.1125

**Hardness Curve Al-1.7Zn-1.7Mg-1.0Cu/2 (at. %) after Ageing at 120 °C**



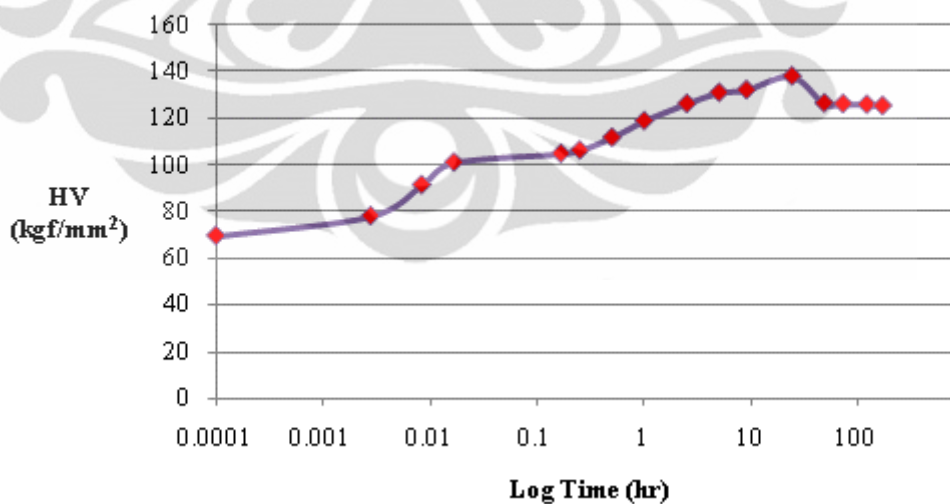


**PADUAN Al-1.7Zn-1.7Mg-1.3Cu (at. %) SELAMA AGEING PADA  
TEMPERATUR 120 °C**

Date of Heat treatment : 24/02/2011  
 Solution Treatment : 470°C (90 min on Salt Bath)  
 Ageing Temperature : 120°C (Oil Bath)  
 Load : 3 kgf, dwell time 10 s

Sample No.	Ageing Treatment (min)	Vickers Hardness Value								
		1	2	3	4	5	6	7	8	Average
1	0	66.5	66.7	68.1	70.9	71.3	72.2	69.8	70.8	69.5375
2	0.166666667	77.6	78.6	76.5	77.5	77.1	79.5	78.5	78.9	78.025
3	0.5	92.9	90.3	90.4	90.9	94.9	91.4	89.5	90.6	91.3625
4	1	104.7	99.4	98.9	104.5	101.2	102.5	103.4	93.8	101.05
5	10	106.8	105.1	107.7	103.2	105.2	106.4	102.6	101.3	104.7875
6	15	108.8	109.3	106	106.3	106.8	105.3	105.1	101.9	106.1875
7	30	112.6	113	115	108.3	109.5	114.6	108.1	112.4	111.6875
8	60	118.4	117.3	117.4	116.7	120.4	122.3	120.2	117.8	118.8125
9	150	127.8	125.1	124.2	124.9	127.5	125.8	127.4	126.8	126.1875
10	300	133.8	128.8	130.1	127.1	132.8	133.7	127.8	133.5	130.95
11	540	129.7	129.9	133.9	132.6	130.8	131.7	136.4	131.7	132.0875
12	1440	138.5	141.5	133.5	133.9	141.5	132.6	141.5	140.9	137.9875
13	2880	130.6	123.7	130.1	129.5	124.4	124.6	125.5	123.1	126.4375
14	4320	124.2	126.1	131.2	125.9	121.6	130	126.1	123.9	126.125
15	7200	122.2	124.2	127.3	123	130.5	127	128.2	124.1	125.8125
16	10080	121.6	128.3	121.6	123.6	128.5	124.2	126.3	128.3	125.3

**Hardness Curve Al-1.7Zn-1.7Mg-1.3Cu (at. %) after Ageing  
at 120 °C**

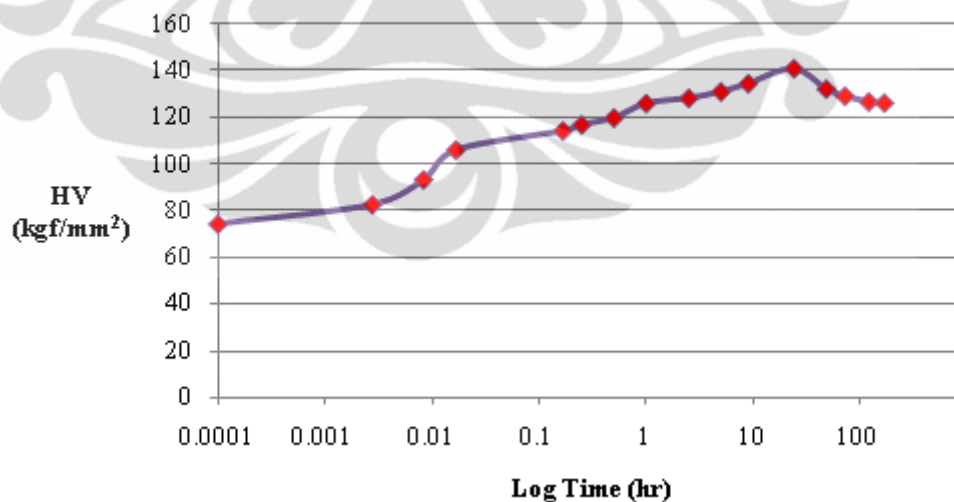


**PADUAN Al-1.7Zn-1.7Mg-1.6Cu (at. %) SELAMA AGEING PADA  
TEMPERATUR 120 °C**

Date of Heat treatment : 24/02/2011  
 Solution Treatment : 470°C (90 min on Salt Bath)  
 Ageing Temperature : 120°C (Oil Bath)  
 Load : 3 kgf, dwell time 10 s

Sample No.	Ageing Treatment (min)	Vickers Hardness Value								Average
		1	2	3	4	5	6	7	8	
1	0	75.3	76.7	74.6	77.1	72	73.1	72.8	74.1	74.4625
2	0.166666667	79.7	81.4	82.2	83.4	83.4	84.8	84.4	83.1	82.8
3	0.5	95.6	88.9	94.1	94.1	94.2	95	93.4	92.8	93.5125
4	1	109.9	100.6	105.1	104.4	109.1	105.6	101.5	112.7	106.1125
5	10	114.4	111.6	115.8	113.2	116.8	115.5	114.2	112.8	114.2875
6	15	117	114.5	115.7	119.3	116.7	119	116.8	116.4	116.925
7	30	118.7	119.5	119.5	123.1	121.3	115.2	120.5	120.8	119.825
8	60	124.2	129.8	124.1	130.5	129.8	124.1	123.3	122.2	126
9	150	127.7	127.5	129.2	128	126	130.2	129.9	127.7	128.275
10	300	133.1	133.2	129.3	127.8	133	133.4	128.9	129.3	131
11	540	136.7	135.1	136.9	129.2	136.2	137.2	136.7	128.2	134.525
12	1440	142	139	141.6	141.3	142.3	139.8	140.5	140.3	140.85
13	2880	131.3	134.2	132	131.8	131.8	131.4	131.7	133.7	132.2375
14	4320	127.8	130.3	128.5	131.2	127	132.3	128.3	128	129.175
15	7200	125.7	126.8	128.3	122.7	127.3	125.6	129.1	128.3	126.725
16	10080	128.4	129.1	125.3	125.4	129	124.6	123.4	124.8	126.25

**Hardness Curve Al-1.7Zn-1.7Mg-1.6Cu (at. %) after Ageing at 120 °C**

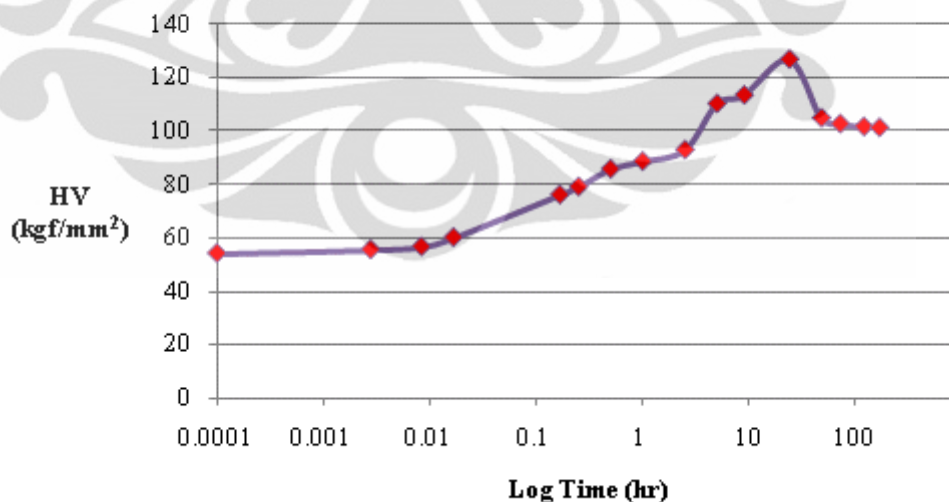


**PADUAN Al-2.1Zn-2.1Mg-0.4Cu (at. %) SELAMA AGEING PADA  
TEMPERATUR 120 °C**

Date of Heat treatment : 12/02/2011  
 Solution Treatment : 470°C (90 min on Salt Bath)  
 Ageing Temperature : 120°C (Oil Bath)  
 Load : 3 kgf, dwell time 10 s

Sample No.	Ageing Treatment (min)	Vickers Hardness Value								
		1	2	3	4	5	6	7	8	Average
1	0	52.8	53.2	53.4	54.5	54.7	54.1	55.1	55	54.1
2	0.166666667	54	56.4	56.5	55.5	54.3	55.9	54.7	56.9	55.525
3	0.5	57.6	57.7	56.3	56.5	56.2	55.8	56.8	56.1	56.625
4	1	60.1	60	60	59.4	59.5	60.3	59.8	61.6	60.0875
5	10	79	73.6	75.2	74.5	76.1	77.7	74.5	78.2	76.1
6	15	79.1	78.2	78.7	77.5	81.4	79.3	80.9	77.5	79.075
7	30	86.7	85.3	88.1	87.8	83.5	83.8	85.9	84.9	85.75
8	60	85.1	86.8	86.2	90.6	91	89.7	90.1	89.6	88.6375
9	150	95.8	94.3	88.9	91.4	92.6	93.2	94.8	92.5	92.9375
10	300	113.1	110.1	108.8	105.3	112.9	108.2	114.9	108.8	110.2625
11	540	112.4	113.4	118.1	116.2	112.4	111.8	110.8	112.8	113.4875
12	1440	129.5	128	126.4	131.5	123.6	122.6	122.7	131	126.9125
13	2880	103.9	101.3	103.9	111.1	107.7	106.6	98.8	105.7	104.875
14	4320	103.5	104.1	102.6	102.1	103.7	100.9	102	102.6	102.6875
15	7200	101.2	100.1	102.7	102.6	100.5	102.1	100.5	103.3	101.625
16	10080	101.6	103.1	102.2	102.1	100.8	98	101.3	101.3	101.3

**Hardness Curve Al-2.1Zn-2.1Mg-0.4Cu (at. %) after  
Ageing at 120 °C**

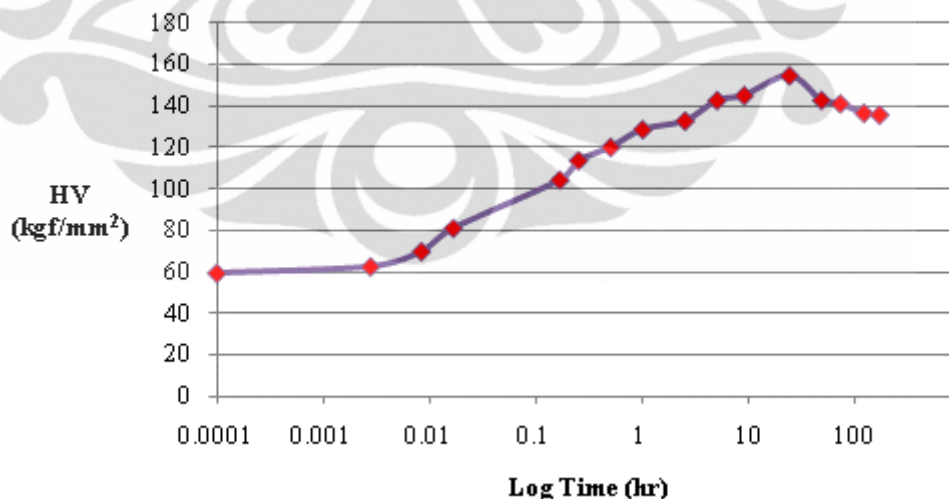


**PADUAN Al-2.1Zn-2.1Mg-0.7Cu (at. %) SELAMA AGEING PADA  
TEMPERATUR 120 °C**

Date of Heat treatment : 15/02/2011  
 Solution Treatment : 470°C (90 min on Salt Bath)  
 Ageing Temperature : 120°C (Oil Bath)  
 Load : 3 kgf, dwell time 10 s

Sample No.	Ageing Treatment (min)	Vickers Hardness Value								Average
		1	2	3	4	5	6	7	8	
1	0	58.5	59.3	58.1	57.8	59.3	60	60.9	59.1	59.125
2	0.166666667	63.6	61.9	62.5	61.4	62.9	63.7	62.1	60.3	62.3
3	0.5	69.5	68.3	70.5	68.3	72.2	68	69.1	70.8	69.5875
4	1	81.7	79	79.1	81.3	84.4	81.7	83.1	76.4	80.8375
5	10	106.1	110.9	107.3	102.8	102.2	100.2	99.4	103.7	104.075
6	15	110.2	117.9	112.3	111.3	117.1	112.3	110.6	116.1	113.475
7	30	118.4	122	121.1	121.9	120	117.9	120	118.1	119.925
8	60	129.1	124.9	128.3	133	129.5	127.1	127.7	128.3	128.4875
9	150	138.2	137.3	127.2	125.3	127.5	141	138.2	126.1	132.6
10	300	141	143.9	140.6	141.7	145.5	143.3	141.2	142.9	142.5125
11	540	144.2	150.2	148.4	145.5	140.4	141.6	146.7	142	144.875
12	1440	154.1	151.3	156	154.5	153.9	153.9	153.8	158.2	154.4625
13	2880	138.3	140.4	146.2	143.6	143.1	144.6	143.9	140.7	142.6
14	4320	136.7	138.9	137.1	143.9	142.7	144.3	143.5	140.2	140.9125
15	7200	136.8	137.4	136	138.7	135.4	134.7	135.3	136.9	136.4
16	10080	133.9	137	135.9	136	134.2	137.8	135.5	134.3	135.575

**Hardness Curve Al-2.1Zn-2.1Mg-0.7Cu (at. %) after Ageing at 120 °C**

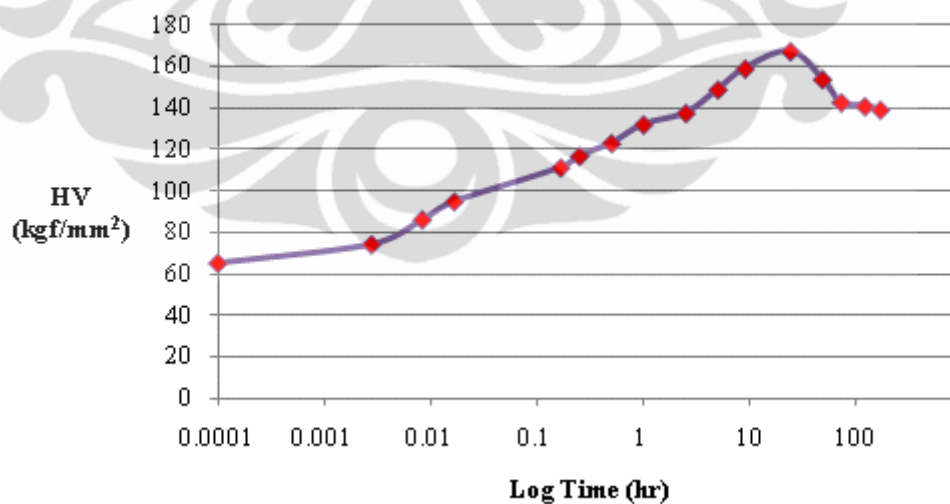


**PADUAN Al-2.1Zn-2.1Mg-1.0Cu (at. %) SELAMA AGEING PADA  
TEMPERATUR 120 °C**

Date of Heat treatment : 17/02/2011  
 Solution Treatment : 470°C (90 min on Salt Bath)  
 Ageing Temperature : 120°C (Oil Bath)  
 Load : 3 kgf, dwell time 10 s

Sample No.	Ageing Treatment (min)	Vickers Hardness Value								Average
		1	2	3	4	5	6	7	8	
1	0	65.5	66	64.8	64.5	66.3	65.4	64.4	64.8	65.2125
2	0.166666667	72.3	72.4	70.9	76.6	74.4	78	73.8	75.7	74.2625
3	0.5	88.2	85.1	87.1	84	85.5	88.4	85.7	85.8	86.225
4	1	91.6	93.6	92.4	94.5	93.1	97.7	97	99.8	94.9625
5	10	110.9	112.8	119.2	110.7	118.2	106.4	105.3	107.3	111.35
6	15	114.8	119.9	119.8	118.3	119.1	116.2	114.6	113	116.9625
7	30	124.2	120.2	122.2	121.4	121	122.6	131	122.3	123.1125
8	60	131.9	129.6	127	129.3	139.8	131	129.8	138.9	132.1625
9	150	141.4	136.2	137.3	137.2	139.3	137.4	137.5	135.3	137.7
10	300	144.4	147.6	154	152.7	146.3	151.8	148.5	147.4	149.0875
11	540	160.9	161.9	152.6	160.5	161	160.5	163.7	152.5	159.2
12	1440	164.5	169.4	168.9	171	172.4	161.3	161.2	171.8	167.5625
13	2880	152.5	157.7	151.5	151.3	154	153.6	153.1	158.5	154.025
14	4320	142.4	148.5	139.5	146	138.5	143.4	139.5	144.9	142.8375
15	7200	139.3	143.9	145.7	139.1	136.1	148.7	142	132.7	140.9375
16	10080	134.1	135.4	141.6	141.5	139.9	142.1	141.3	138.4	139.2875

**Hardness Curve Al-2.1Zn-2.1Mg-1.0Cu (at. %) after Ageing at 120 °C**



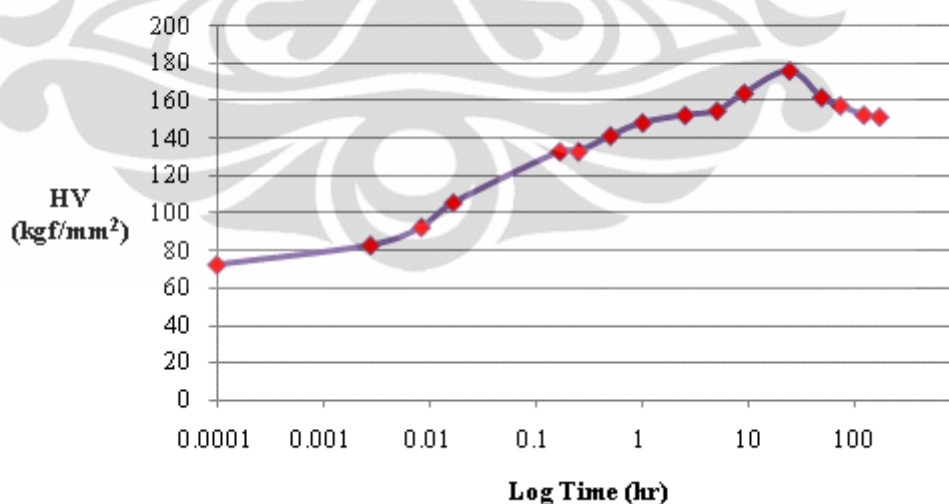


**PADUAN Al-2.1Zn-2.1Mg-1.3Cu/2 (at. %) SELAMA AGEING PADA  
TEMPERATUR 120 °C**

Date of Heat treatment : 24/02/2011  
 Solution Treatment : 470°C (90 min on Salt Bath)  
 Ageing Temperature : 120°C (Oil Bath)  
 Load : 3 kgf; dwell time 10 s

Sample No.	Ageing Treatment (min)	Vickers Hardness Value								
		1	2	3	4	5	6	7	8	Average
1	0	72	70.3	74.4	68.8	72.9	73.3	74.8	74	72.5625
2	0.166666667	85.2	80.8	83	83.7	84.5	80.7	80.6	85.6	83.0125
3	0.5	91.5	94.5	88.3	88.9	96	92.4	95	94.1	92.5875
4	1	108.2	106.8	108.6	106.8	105	102.9	103.9	103.6	105.725
5	10	131.7	134.5	133.1	135.2	133	135.5	128.8	133.5	133.1625
6	15	134.3	137.6	130.4	129.6	138.4	130.4	129.8	135.2	133.2125
7	30	141.4	142.2	146.8	142.3	138	138.9	135.1	147.9	141.575
8	60	146.8	152.1	151.8	143.2	143.3	150.5	151.7	149.1	148.5625
9	150	155.7	152.8	156	150.1	154.9	150.3	150.5	150.6	152.6125
10	300	152.6	153.2	152.3	157.4	152.7	153.3	157.2	160.8	154.9375
11	540	164.2	166	160.5	162.9	160	163.9	169.1	168.3	164.3625
12	1440	169.9	176.8	176.1	169.6	178.5	180.8	178.1	181.2	176.375
13	2880	158.8	161.9	162	163.8	161.9	161	164.1	163.8	162.1625
14	4320	159.8	158.2	153	160	158.5	155.7	159.8	157.2	157.775
15	7200	149.8	148.8	149.6	155.8	154.4	156.2	149.7	157.8	152.7625
16	10080	154.7	148.7	150.1	151.2	150.2	154.4	151.9	152.7	151.7375

**Hardness Curve Al-2.1Zn-2.1Mg-1.3Cu/2 (at. %) after Ageing at 120 °C**

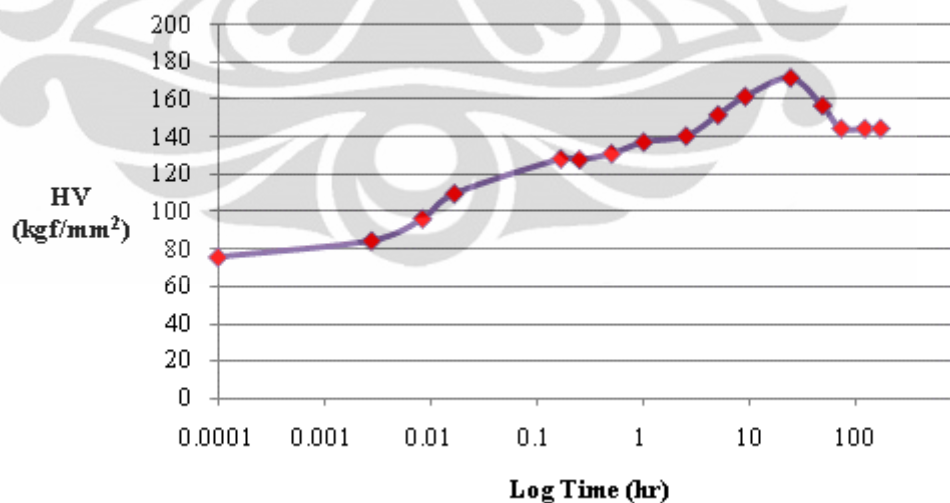


**PADUAN Al-2.1Zn-2.1Mg-1.6Cu (at. %) SELAMA AGEING PADA  
TEMPERATUR 120 °C**

Date of Heat treatment : 28/02/2011  
 Solution Treatment : 470°C (90 min on Salt Bath)  
 Ageing Temperature : 120°C (Oil Bath)  
 Load : 3 kgf, dwell time 10 s

Sample No.	Ageing Treatment (min)	Vickers Hardness Value								Average
		1	2	3	4	5	6	7	8	
1	0	73.8	75.5	78.4	76.8	76.9	76	74.1	75.9	75.925
2	0.166666667	81.3	83.7	83.7	87.6	87.6	83.9	84.5	85	84.6625
3	0.5	99.5	98.4	89.9	94.2	96.3	95.5	102.2	95.3	96.4125
4	1	106.9	107.8	108.7	110.2	111.2	111.7	110.4	111.2	109.7625
5	10	130.3	125.8	128	126.2	131.2	130.6	122.9	131.5	128.3125
6	15	126.1	128.8	129.7	125.4	131	126.2	129.4	127.3	127.9875
7	30	136.3	136.5	133.5	127.4	132.8	131.8	123.3	126.8	131.05
8	60	138	136	137.6	137.2	137.6	138.2	136.7	136.7	137.25
9	150	138.7	136.8	143.1	145.3	139.5	145.7	136	138.2	140.4125
10	300	148.5	146.7	157.2	148.2	151.7	158.8	149.5	153.1	151.7125
11	540	159.3	149.7	158.3	168.7	168.4	159.8	159.4	168.5	161.5125
12	1440	168.1	179.7	171.8	174.2	169.8	169.9	169.5	168.6	171.45
13	2880	155.8	158.5	156.4	155.7	156.7	154.6	158.1	157.9	156.7125
14	4320	142.7	142.9	154.4	145.6	144	142.4	141	143.1	144.5125
15	7200	147	149.3	146.9	143.6	141.1	141.1	143.7	142.8	144.4375
16	10080	145.8	145.1	144.4	142.4	145.6	145.1	144.2	143.3	144.4875

**Hardness Curve Al-2.1Zn-2.1Mg-1.6Cu (at. %) after  
Ageing at 120 °C**

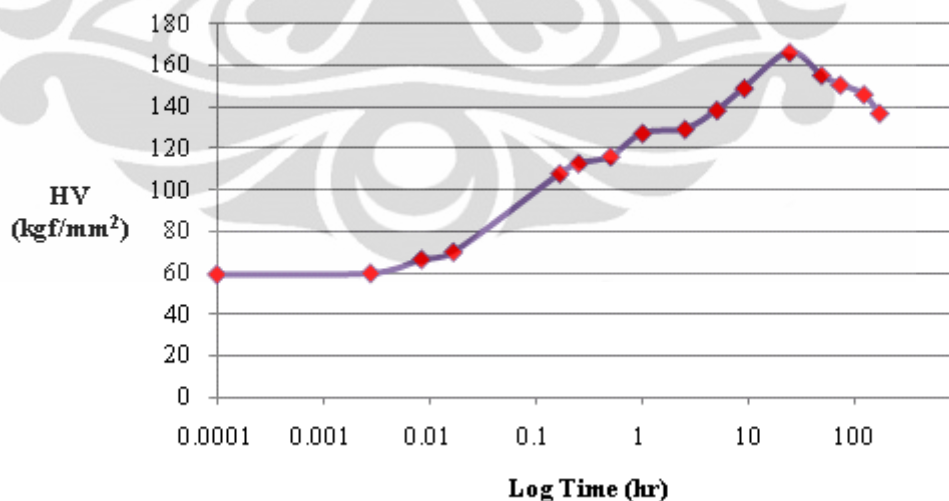


**PADUAN Al-2.5Zn-2.5Mg-0.4Cu (at. %) SELAMA AGEING PADA  
TEMPERATUR 120 °C**

Date of Heat treatment : 15/02/2011  
 Solution Treatment : 470°C (90 min on Salt Bath)  
 Ageing Temperature : 120°C (Oil Bath)  
 Load : 3 kgf; dwell time 10 s

Sample No.	Ageing Treatment (min)	Vickers Hardness Value								
		1	2	3	4	5	6	7	8	Average
1	0	58.3	59	58.6	58.7	60.7	59.3	61	61.1	59.5875
2	0.166666667	59.9	60.1	59.5	60	59.9	60	61.3	60.4	60.1375
3	0.5	67.8	68.2	66.4	67.1	67.3	67	64.9	65.8	66.8125
4	1	72.2	71	70.7	69.5	70.9	69.2	70	69.3	70.35
5	10	109.2	107.7	111.1	106.3	110	109.2	105.3	105.8	108.075
6	15	113	112.6	110.7	112.4	110.7	115.5	115.9	112.7	112.9375
7	30	116.3	115.7	113.8	116.7	113.3	116.9	119	118.6	116.2875
8	60	130.3	126.3	124.9	127.8	127.6	127.9	125.8	129.3	127.4875
9	150	131.2	130	127.3	131.2	130.8	130.8	128.3	125.9	129.4375
10	300	139.1	141.4	136.7	135.8	140.6	137.4	139.3	138.4	138.5875
11	540	143.5	144.9	154.8	147.7	156	145.7	147.9	152.9	149.175
12	1440	169.6	163.3	165.6	170.3	164.5	162.5	168	167.1	166.3625
13	2880	154.4	158.1	152.1	161.2	152.7	156.6	154.8	153.6	155.4375
14	4320	147.6	150.3	148.7	151.8	150.1	157.8	151.6	148.3	150.775
15	7200	146.6	145.5	146.3	146.6	142	144.4	150.4	147.4	146.15
16	10080	134.4	140.3	136.9	136.1	136.1	139.6	133.9	139.7	137.125

**Hardness Curve Al-2.5Zn-2.5Mg-0.4Cu (at. %) after Ageing at 120 °C**

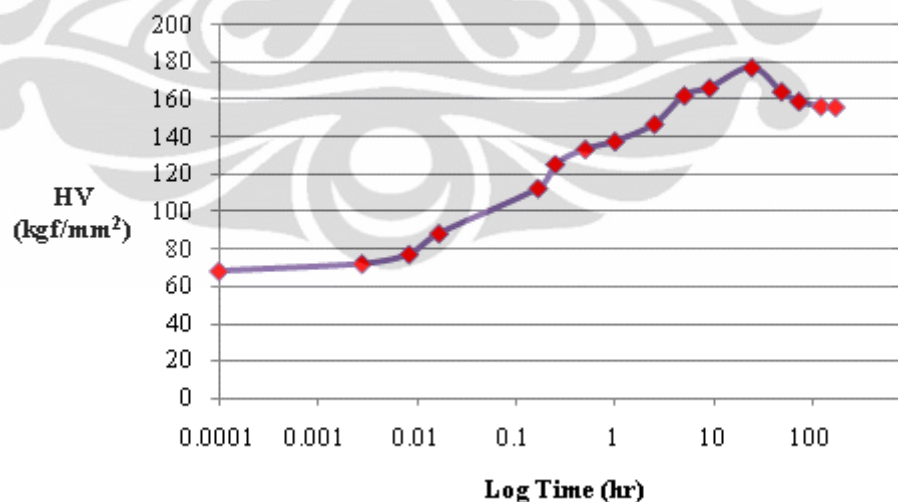


**PADUAN Al-2.5Zn-2.5Mg-0.7Cu (at. %) SELAMA AGEING PADA  
TEMPERATUR 120 °C**

Date of Heat treatment : 17/02/2011  
 Solution Treatment : 470°C (90 min on Salt Bath)  
 Ageing Temperature : 120°C (Oil Bath)  
 Load : 3 kgf; dwell time 10 s

Sample No.	Ageing Treatment (min)	Vickers Hardness Value								
		1	2	3	4	5	6	7	8	Average
1	0	68.1	67.1	67.1	68.4	69.3	69.1	67.4	67.6	68.0125
2	0.166666667	72.3	71.1	72.2	72	69.9	72.2	72.7	73.1	71.9375
3	0.5	80.2	74.9	77.7	76.1	75.9	78.3	76.5	76.8	77.05
4	1	89.2	86.7	88.8	90.7	89.6	90.6	84.7	85.3	88.2
5	10	105.2	114.2	112.7	115.4	109	113.9	114.9	114.3	112.45
6	15	128	125.4	128.1	123.4	125.3	123.7	124	124.8	125.3375
7	30	131.5	130.3	133.4	134.2	130.7	135.5	131	139.9	133.3125
8	60	134.3	130.6	136.8	143.5	141	134.7	134.5	144.9	137.5375
9	150	146.7	147.5	148.3	149.1	143.3	148.7	149	142	146.825
10	300	158.5	163.7	161.5	158.6	164.6	160.7	164.9	164.2	162.0875
11	540	161	168.6	166.2	168	163	168.6	165.9	168.1	166.175
12	1440	179.6	173.6	174.3	179	180.8	175.6	179.8	173.9	177.075
13	2880	160.3	164.9	161.7	166.2	168.5	161.2	164.9	165.9	164.2
14	4320	159.3	154.9	158.3	159.6	162.5	159.3	158.9	158.6	158.925
15	7200	152.7	158.2	155.8	161.2	160.3	155.9	153.9	152.8	156.35
16	10080	149.2	152.3	161.3	158.3	161.7	153.1	152.5	159.2	155.95

**Hardness Curve Al-2.5Zn-2.5Mg-0.7Cu (at. %) after Ageing at 120 °C**

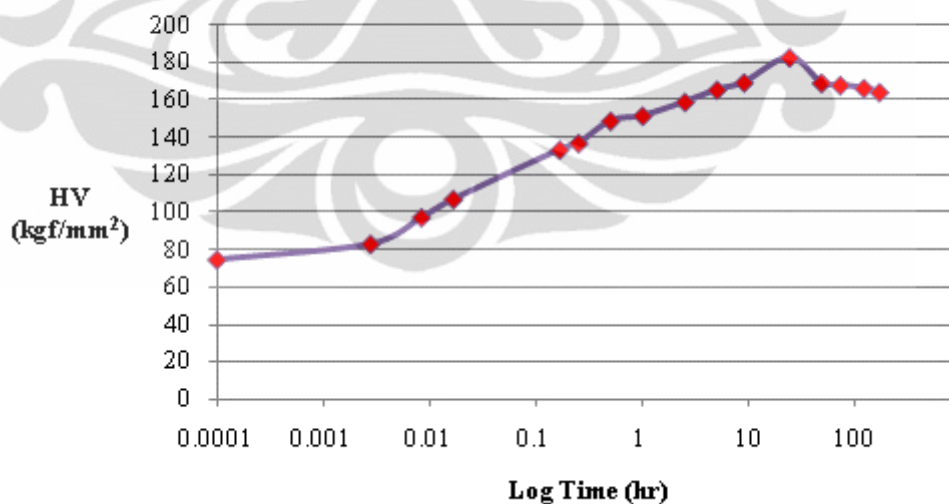


**PADUAN Al-2.5Zn-2.5Mg-1.0Cu (at. %) SELAMA AGEING PADA  
TEMPERATUR 120 °C**

Date of Heat treatment : 24/02/2011  
 Solution Treatment : 470°C (90 min on Salt Bath)  
 Ageing Temperature : 120°C (Oil Bath)  
 Load : 3 kgf; dwell time 10 s

Sample No.	Ageing Treatment (min)	Vickers Hardness Value								Average
		1	2	3	4	5	6	7	8	
1	0	70.6	76	75.9	71.2	79.3	70.8	76.6	73.7	74.2625
2	0.166666667	83.1	83.1	81.8	84.1	82.4	81.4	80	85.7	82.7
3	0.5	96.5	96.9	95.8	99.1	97.1	96.4	97.6	96.5	96.9875
4	1	106.1	105	105.5	109.6	104.6	106.5	106.7	110.2	106.775
5	10	133.3	130.6	130.8	132.2	130.7	139.5	138.9	130.8	133.35
6	15	137.7	131.6	137.2	137.3	139.9	137.3	138.7	135	136.8375
7	30	149.2	148.7	150.6	148.5	148.4	148.3	149	148.1	148.85
8	60	152.4	151.5	151.1	150.6	151.5	151.9	153.5	150.2	151.5875
9	150	154	158.7	165	159.6	162	156.7	155.2	160.9	159.0125
10	300	167.6	165.1	168.1	162.4	165.1	166.2	164.2	165.7	165.55
11	540	178.6	166.4	170	165.5	169.9	170.3	168.3	166.8	169.475
12	1440	178.5	184.8	186.4	182.8	185.6	178.9	182.1	184.2	182.9125
13	2880	169.7	169.8	168.7	169.6	169.9	166.5	168.7	171.3	169.275
14	4320	167.3	169.3	169.7	169.8	165.4	167.6	167.9	167.3	168.0375
15	7200	162.7	167	165.1	169.3	167.3	169.1	164.6	166.1	166.4
16	10080	165.8	165.6	165.1	166.8	166.4	165.1	155	164.1	164.2375

**Hardness Curve Al-2.5Zn-2.5Mg-1.0Cu (at. %) after Ageing at 120 °C**



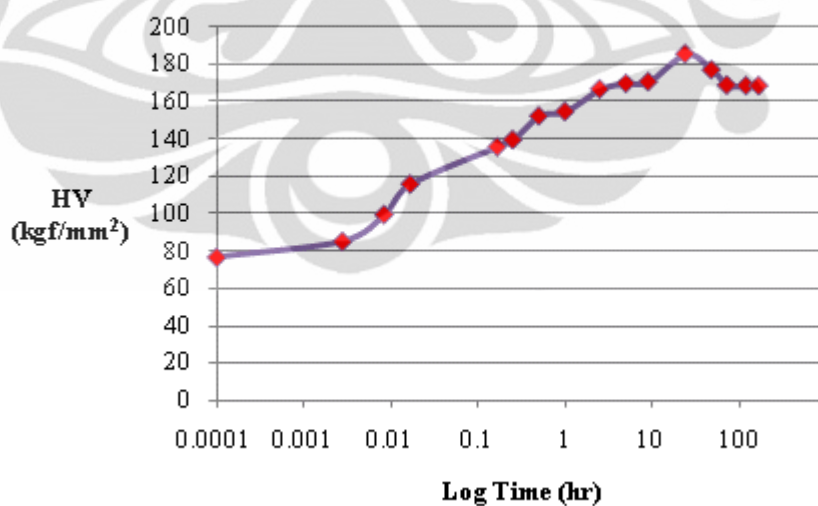


**PADUAN Al-2.5Zn-2.5Mg-1.3Cu (at. %) SELAMA AGEING PADA  
TEMPERATUR 120 °C**

Date of Heat treatment : 28/02/2011  
 Solution Treatment : 470°C (90 min on Salt Bath)  
 Ageing Temperature : 120°C (Oil Bath)  
 Load : 3 kgf; dwell time 10 s

Sample No.	Ageing Treatment (min)	Vickers Hardness Value								
		1	2	3	4	5	6	7	8	Average
1	0	75.7	76.6	74.6	76.8	77.8	78.4	76.2	75.4	76.4375
2	0.166666667	81.9	86.8	86.4	86.6	81.7	82.9	85.8	87.2	84.9125
3	0.5	101	96.3	100.7	98.5	100.7	101	101.4	95.4	99.375
4	1	115.8	118.4	120.4	110.1	117.9	116.3	111.4	115	115.6625
5	10	136.9	132.4	132.2	138.6	134.6	139.1	134.2	137.7	135.7125
6	15	141.5	138.8	140	138.7	139.4	138	141.5	137.8	139.4625
7	30	150.5	151.1	150.3	150.9	159.3	143.3	159.3	152.9	152.2
8	60	152.6	152.9	149.5	149.2	159.7	155.3	159	158.6	154.6
9	150	165.4	168	166.6	168	166.1	170.6	162	166.2	166.6125
10	300	168.8	169.7	171.6	173	167.5	166.8	170.3	169.1	169.6
11	540	171	170.2	170.5	169.9	171	170.2	170.6	170.8	170.525
12	1440	187.2	189.4	188.3	186	186.9	179.1	186.5	179.9	185.4125
13	2880	180.8	173.2	178.5	179.5	180.4	171.2	179	172.7	176.9125
14	4320	167.2	170.8	168.1	163.8	172.8	169.8	171	166.4	168.7375
15	7200	177.7	174.3	171.8	161.4	163.2	163	166.6	169.4	168.425
16	10080	170.7	160.7	173.3	173.1	170	171.2	167.8	160.4	168.4

**Hardness Curve Al-2.5Zn-2.5Mg-1.3Cu after  
Ageing at 120 °C**

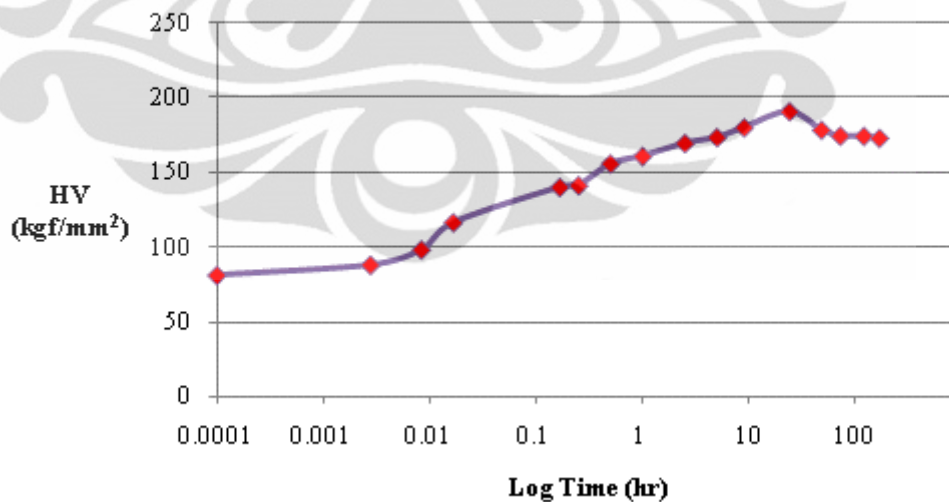


**PADUAN Al-2.5Zn-2.5Mg-1.6Cu (at. %) SELAMA AGEING PADA  
TEMPERATUR 120 °C**

Date of Heat treatment : 28/02/2011  
 Solution Treatment : 470°C (90 min on Salt Bath)  
 Ageing Temperature : 120°C (Oil Bath)  
 Load : 3 kgf, dwell time 10 s

Sample No.	Ageing Treatment (min)	Vickers Hardness Value								Average
		1	2	3	4	5	6	7	8	
1	0	82.6	80.4	79.5	83.6	79.5	81	81.2	80.5	81.0375
2	0.166666667	84.8	86.7	87.4	85.6	91.1	91.1	86.3	89.9	87.8625
3	0.5	98.4	99.8	98.4	96.3	98.6	98.3	96.5	98.9	98.15
4	1	112.9	116.6	119.3	118.8	117.2	119.6	110.2	116.9	116.4375
5	10	141.8	141.2	138.7	136.1	138.7	142.6	141.3	140.7	140.1375
6	15	146.2	137.6	138.8	145.6	147.4	138.9	137.4	139.2	141.3875
7	30	156.7	153.6	155.4	157.9	153.9	155.1	159.2	155.8	155.95
8	60	160	158.7	163.3	158.1	160.5	163.8	161.3	162.5	161.025
9	150	169.4	174.2	170.8	162.9	171.1	174.3	164.7	169.8	169.65
10	300	170.4	173.2	170.8	176.4	173.3	170.7	178.4	175.5	173.5875
11	540	181.3	178.5	179.3	178.9	181.3	181.2	181.2	180	180.2125
12	1440	191.8	189.8	190.6	190.9	191.3	190.4	192	191.1	190.9875
13	2880	175	179.9	179.6	179.2	178.8	177.6	181.1	177.9	178.6375
14	4320	177.5	172.2	173.3	173.4	173.6	174	175.7	177.7	174.675
15	7200	175.7	172.3	173.7	173.2	174.6	173	176.6	176.4	174.4375
16	10080	178	170	172.2	169.7	168	178.3	174.3	174.5	173.125

**Hardness Curve Al-2.5Zn-2.5Mg-1.6Cu (at. %) after  
Ageing at 120 °C**

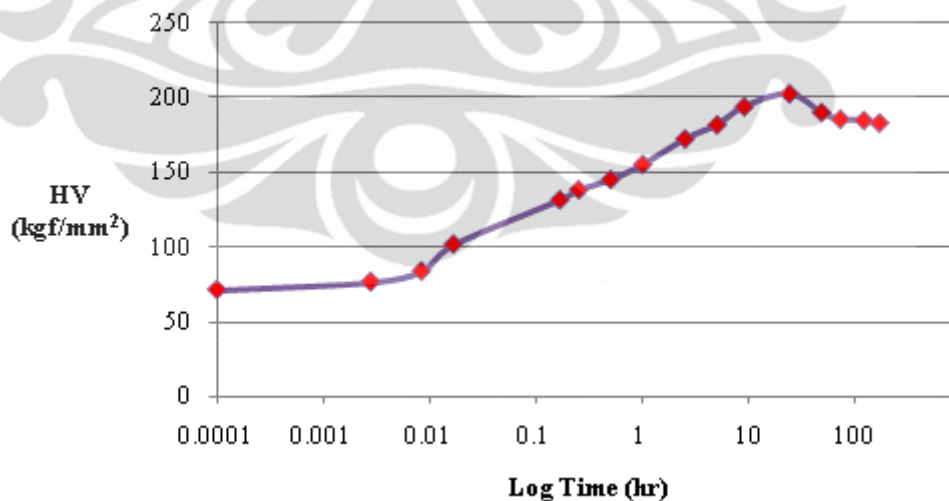


**PADUAN Al-2.9Zn-2.9Mg-0.4Cu (at. %) SELAMA AGEING PADA  
TEMPERATUR 120 °C**

Date of Heat treatment : 19/02/2011  
 Solution Treatment : 470°C (90 min on Salt Bath)  
 Ageing Temperature : 120°C (Oil Bath)  
 Load : 3 kgf; dwell time 10 s

Sample No.	Ageing Treatment (min)	Vickers Hardness Value								Average
		1	2	3	4	5	6	7	8	
1	0	70.7	68.3	67.8	69.1	69.6	71	75.6	75.1	70.9
2	0.166666667	77.1	74.5	77.6	73.6	75.6	78.3	77.3	75.9	76.2375
3	0.5	83.7	80.7	85.6	83.7	82.5	83.4	84.8	82.7	83.3875
4	1	99.2	98.8	100	102.3	102.7	102.6	102.8	102.4	101.35
5	10	127.5	131	130.1	129.5	135.7	135.5	131.8	127.8	131.1125
6	15	138.5	137.5	140.6	135.9	136.1	136.1	137.7	139.8	137.775
7	30	144.2	144.7	143.7	146.5	147.7	145.9	143	142.3	144.75
8	60	156.7	156.4	155.6	156.9	153.4	154.3	153.2	151.9	154.8
9	150	175.7	170.4	166.6	173.9	173.6	164.5	176.3	173.9	171.8625
10	300	178.8	179.9	181.7	179.5	184.8	181.6	184.8	179.5	181.325
11	540	190.6	195.9	194.3	196.1	193.6	192.5	188.9	195.9	193.475
12	1440	198.9	202	204.1	201.3	201.5	208.4	199.7	201.1	202.125
13	2880	187.4	185.2	190.8	191.1	189.1	187.7	193.6	192.6	189.6875
14	4320	183.9	184.8	187.7	181.8	186.9	185.9	184.7	185.7	185.175
15	7200	180.7	182.2	183.9	184.9	186.1	186	186.9	183.6	184.2875
16	10080	187	183.1	182	186.7	169.6	183.2	181.8	187.6	182.625

**Hardness Curve Al-2.9Zn-2.9Mg-0.4Cu (at. %) after  
Ageing at 120 °C**

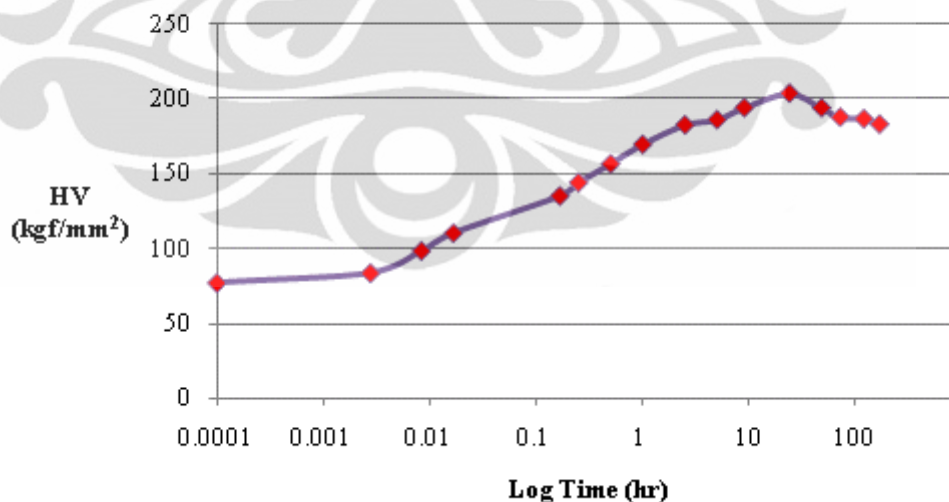


**PADUAN Al-2.9Zn-2.9Mg-0.7Cu (at. %) SELAMA AGEING PADA  
TEMPERATUR 120 °C**

Date of Heat treatment : 22/02/2011  
 Solution Treatment : 470°C (90 min on Salt Bath)  
 Ageing Temperature : 120°C (Oil Bath)  
 Load : 3 kgf; dwell time 10 s

Sample No.	Ageing Treatment (min)	Vickers Hardness Value								
		1	2	3	4	5	6	7	8	Average
1	0	77.5	76.8	75.5	77.1	76	77.1	78.2	76.9	76.8875
2	0.166666667	82.3	83.5	79.8	84.9	84.6	82.8	83.8	86.2	83.4875
3	0.5	97.8	96.8	100.1	97.2	99.8	97.8	98.5	99	98.375
4	1	107.8	110.7	109.8	108.6	108.6	111.5	113.1	111.7	110.225
5	10	133.7	130.7	138.7	139.1	133	134.7	136.7	134.2	135.1
6	15	145.6	144.2	142.3	145.3	145.9	141.7	144.4	143.2	144.075
7	30	162.3	156.4	158.2	161.6	158.6	151.9	150.1	153.6	156.5875
8	60	170.7	167	168.7	169.2	170.5	169.2	171.7	169.8	169.6
9	150	178.1	184.1	182.3	182.5	187	181.2	182.9	183.1	182.65
10	300	186	184.2	186.7	184.3	187.2	188.6	186.1	186	186.1375
11	540	194.1	197.9	191.3	190.9	197.2	193.5	193.4	195.1	194.175
12	1440	205.6	202.5	205.3	199.6	206.7	200.6	204.6	205.5	203.8
13	2880	201.3	192.5	187.5	191.7	200.6	185.7	199.4	194.2	194.1125
14	4320	189.7	188.9	187.3	188.2	180.6	188.6	189.8	189.3	187.8
15	7200	192.1	183.3	188.8	185	183	191.1	180.2	190.2	186.7125
16	10080	181.3	182.9	179.9	186.2	179	187.6	179.3	188.7	183.1125

**Hardness Curve Al-2.9Zn-2.9Mg-0.7Cu (at. %) after Ageing at 120 °C**

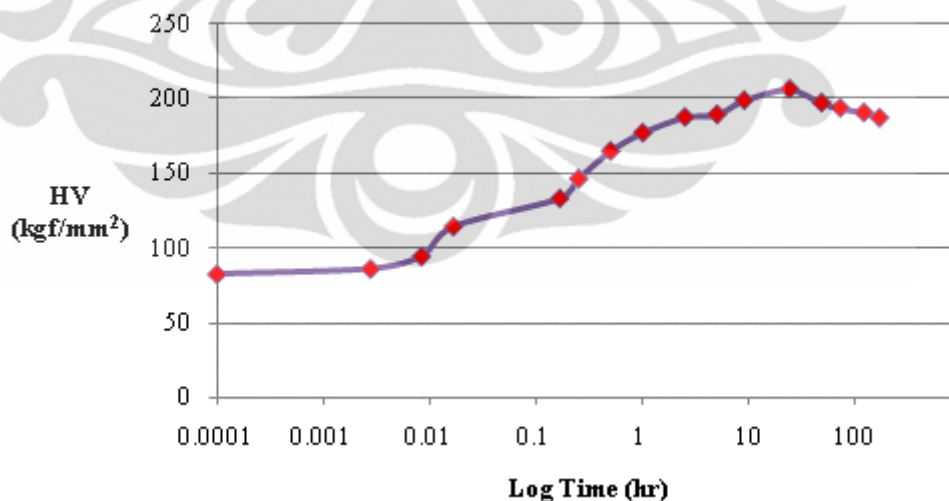


**PADUAN Al-2.9Zn-2.9Mg-1.0Cu (at. %) SELAMA AGEING PADA  
TEMPERATUR 120 °C**

Date of Heat treatment : 22/02/2011  
 Solution Treatment : 470°C (90 min on Salt Bath)  
 Ageing Temperature : 120°C (Oil Bath)  
 Load : 3 kgf; dwell time 10 s

Sample No.	Ageing Treatment (min)	Vickers Hardness Value								Average
		1	2	3	4	5	6	7	8	
1	0	83	83	83.6	82	83.2	82.3	81.5	83.6	82.775
2	0.166666667	85.3	84.4	88.6	88.2	84.7	86.2	88.5	84.6	86.3125
3	0.5	94.3	92.2	93.5	93.1	93.7	96.9	97.7	96.2	94.7
4	1	112.9	110.3	117.2	117.4	112.2	111.1	119.5	115.6	114.525
5	10	133	130.5	132.2	130.8	133.9	134.1	130.5	140.9	133.2375
6	15	146.3	146.4	143.4	146.5	148.7	145	144.4	149.5	146.275
7	30	164.4	167.2	165.8	161.2	163.7	160.2	167.1	167.8	164.675
8	60	175.5	176.9	179.7	174.4	178.1	177.4	175	177.7	176.8375
9	150	190.8	189.5	189.1	181.9	183.6	188.2	185.6	189.5	187.275
10	300	188.9	200.7	185.2	190	189.7	182.5	187.7	187.8	189.0625
11	540	200.1	201.2	197.4	197.1	197	199	197.5	198.4	198.4625
12	1440	208.2	208.4	200.6	205.3	204.7	206.5	204	209.5	205.9
13	2880	202.3	197.3	190.1	197	198.9	197.6	194.4	197.1	196.8375
14	4320	201	198.5	188.9	197	188.5	197.2	189.1	187.2	193.425
15	7200	195.2	188.5	188.7	194.2	188.8	185.8	192	189.6	190.35
16	10080	188.4	188.9	183.4	187.3	189.5	185	185.3	186.9	186.8375

**Hardness Curve Al-2.9Zn-2.9Mg-1.0Cu (at. %) after  
Ageing at 120 °C**



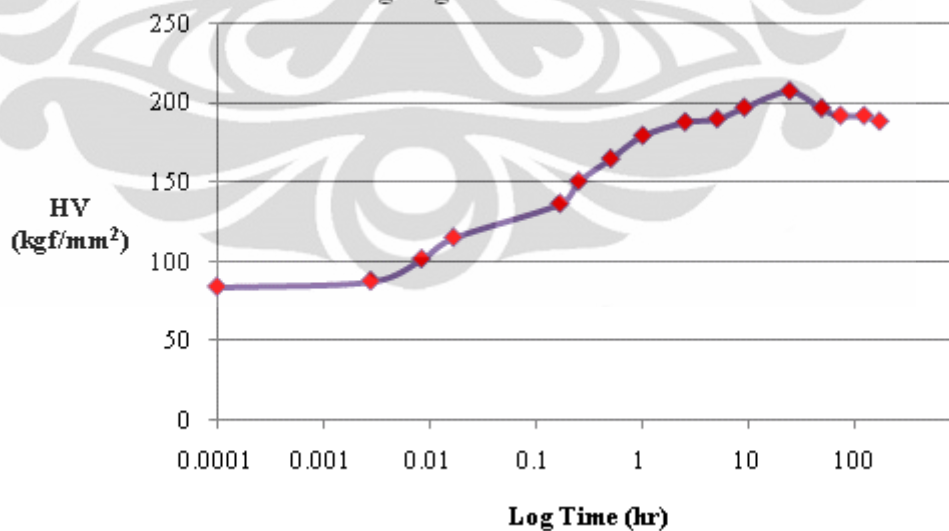


**PADUAN Al-2.9Zn-2.9Mg-1.3Cu (at. %) SELAMA AGEING PADA  
TEMPERATUR 120 °C**

Date of Heat treatment : 28/02/2011  
 Solution Treatment : 470°C (90 min on Salt Bath)  
 Ageing Temperature : 120°C (Oil Bath)  
 Load : 3 kgf, dwell time 10 s

Sample No.	Ageing Treatment (min)	Vickers Hardness Value								Average
		1	2	3	4	5	6	7	8	
1	0	84.7	82.5	83.9	83.5	86.5	81.3	85.3	85	84.0875
2	0.166666667	87.8	85.5	87.6	90.1	89.8	83.6	86.2	91	87.7
3	0.5	102.7	103	102.2	96.7	100.4	102.4	102.1	104.2	101.7125
4	1	112.5	114.9	113.5	115.5	115	115.6	117.3	118	115.2875
5	10	135.1	127.8	140.9	140.6	139.5	139.1	136.8	133.9	136.7125
6	15	144.9	139.8	152.9	150.4	154.6	155.3	154.3	154.7	150.8625
7	30	167.7	166.8	163.8	168.5	166.7	162.6	162.3	162.1	165.0625
8	60	180	177	182.5	179	181.7	179.5	175.2	182.2	179.6375
9	150	182.9	188.6	188.7	189.7	189.3	188.3	189.2	188.9	188.2
10	300	189.9	188.9	189.8	188.8	187.5	193.4	193.1	191.1	190.3125
11	540	197.6	198.8	189.4	198.4	198.7	199.5	197.8	199.1	197.4125
12	1440	204.8	204.8	204.6	209	209	209.9	209.6	210.8	207.8125
13	2880	197.9	195.7	194.8	197.8	197.3	197	198.7	196.3	196.9375
14	4320	195.5	191.3	190.4	185.7	194.9	191.1	193.4	195.9	192.275
15	7200	194.1	190	195.6	191.5	192.2	191.7	191.9	191	192.25
16	10080	191.8	188.9	186.7	184.4	189	190	186.5	192.5	188.725

**Hardness Curve Al-2.9Zn-2.9Mg-1.3Cu (at. %) after  
Ageing at 120 °C**

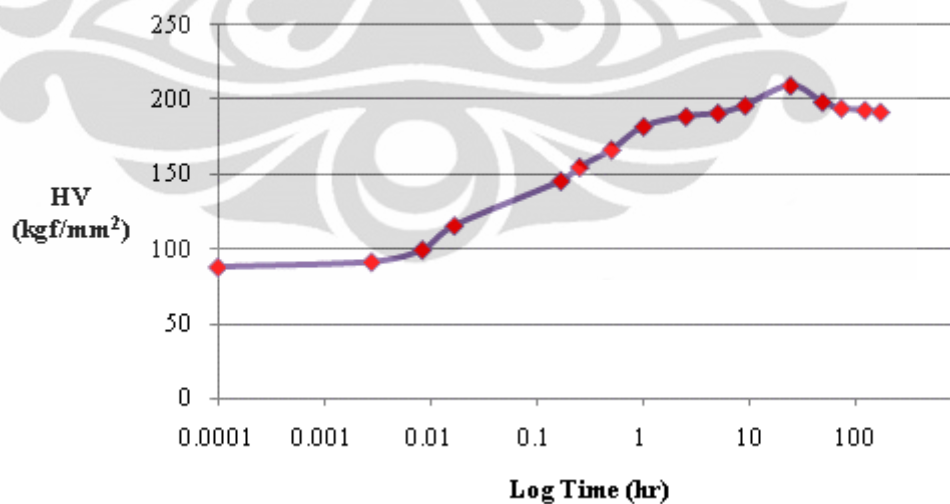


**PADUAN Al-2.9Zn-2.9Mg-1.6Cu (at. %) SELAMA AGEING PADA  
TEMPERATUR 120 °C**

Date of Heat treatment : 28/02/2011  
 Solution Treatment : 470°C (90 min on Salt Bath)  
 Ageing Temperature : 120°C (Oil Bath)  
 Load : 3 kgf, dwell time 10 s

Sample No.	Ageing Treatment (min)	Vickers Hardness Value								Average
		1	2	3	4	5	6	7	8	
1	0	83.6	85.6	87.2	89.7	90.5	86.1	89	89.1	87.6
2	0.166666667	87.1	87.6	94.2	91.5	94.3	92	90.6	91.3	91.075
3	0.5	98.7	105.2	97.4	104	94.5	95.1	95.5	103.4	99.225
4	1	113.2	115.8	118.5	115.8	112.7	114.2	116.6	116.3	115.3875
5	10	138.9	150.6	143.3	147	144.4	146	146.5	145.4	145.2625
6	15	155.8	148.4	158.3	159.9	149.5	155.2	154.8	154.5	154.55
7	30	164.4	169.6	161.8	169.3	169.4	168.3	159.7	166.9	166.175
8	60	182	181.6	180.9	183.2	181.8	182.1	181.1	180.8	181.6875
9	150	186.8	189.4	188.7	187.5	188.2	188.5	188.8	189.3	188.4
10	300	191.7	191.9	193.6	187.1	192.7	188.9	190.3	188.9	190.6375
11	540	194.1	198.6	198.8	192.8	198.4	189.6	196.3	197.4	195.75
12	1440	209.6	207.1	207.2	210	210.5	208.2	208.1	212.2	209.1125
13	2880	194.2	198.9	198.3	199.5	198.4	198.1	197.6	199.7	198.0875
14	4320	191.8	190.5	195.5	192.8	193.7	195.9	195	195.9	193.8875
15	7200	193.4	190.9	195	195.1	190.4	194.3	193.6	188.6	192.6625
16	10080	196.1	191.3	192.3	187.3	186.6	194	188.7	194.9	191.4

**Hardness Curve Al-2.9Zn-2.9Mg-1.6Cu (at. %) after Ageing at 120 °C**

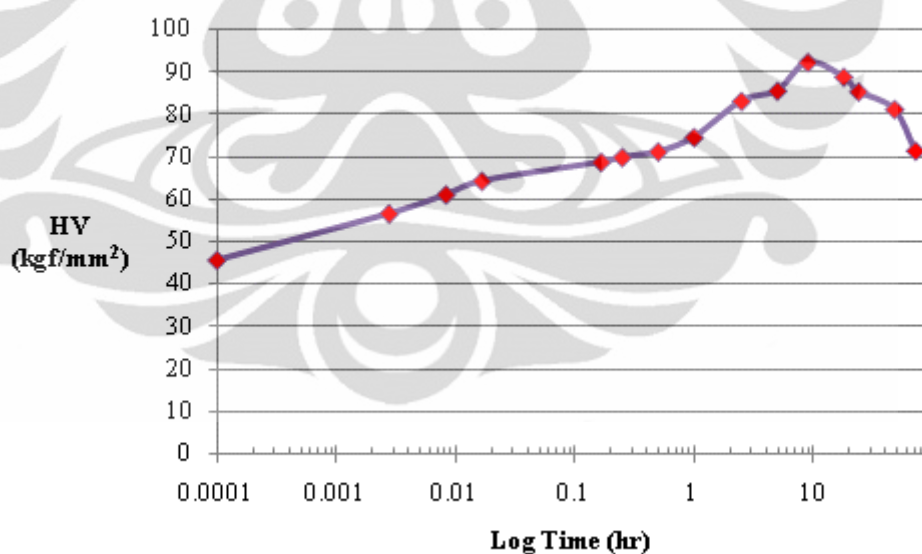


**PADUAN Al-1.7Zn-1.7Mg-0.4Cu (at. %) SELAMA AGEING PADA  
TEMPERATUR 190 °C**

Date of Heat treatment : 2/03/2011  
 Solution Treatment : 470°C (90 min on Salt Bath)  
 Ageing Temperature : 190°C (Oil Bath)  
 Load : 3 kgf, dwell time 10 s

Sample No.	Ageing Treatment (min)	Vickers Hardness Value								Average
		1	2	3	4	5	6	7	8	
1	0	45.8	45.8	43.8	46.4	46.7	44.9	45.6	45.1	45.5125
2	0.166666667	56.9	56.5	57.4	54.8	55.6	59.1	56.3	55.7	56.5375
3	0.5	61.8	61.7	60.3	61.3	60.8	60.7	60.7	60.8	61.0125
4	1	65	62.4	66.4	65.1	64.2	64.4	63.2	63.2	64.2375
5	10	67.4	69.7	67.9	69.9	68.5	68.8	68.5	68.9	68.7
6	15	70.7	70	69.7	68.3	70	69.8	70.8	69.5	69.85
7	30	72.6	70.3	71.3	70.6	71.3	70.7	70.9	71.7	71.175
8	60	73.3	73.9	74.3	74.3	76.7	74.2	74.1	75.8	74.575
9	150	82.5	83	83.6	83.4	83.4	83.5	81.9	83.7	83.125
10	300	86.1	86.1	86.5	86	84.6	87	84.1	84.2	85.575
11	540	90.3	90.1	89.7	86.8	95.9	96.3	96.9	92.5	92.3125
12	1080	90.6	90.3	86.2	84.1	89.2	87.7	89.9	92.9	88.8625
13	1440	88.4	87.9	87.4	85.4	84.6	81.6	86.1	81.8	85.4
14	2880	82.5	81.6	83.7	81.8	80.4	80.3	80.1	79.3	81.2125
15	4320	79.4	81	81.9	8.7	80.2	79.7	80	80.3	71.4

**Hardness Curve Al-1.7Zn-1.7Mg-0.4Cu (at. %) after Ageing at 190 °C**

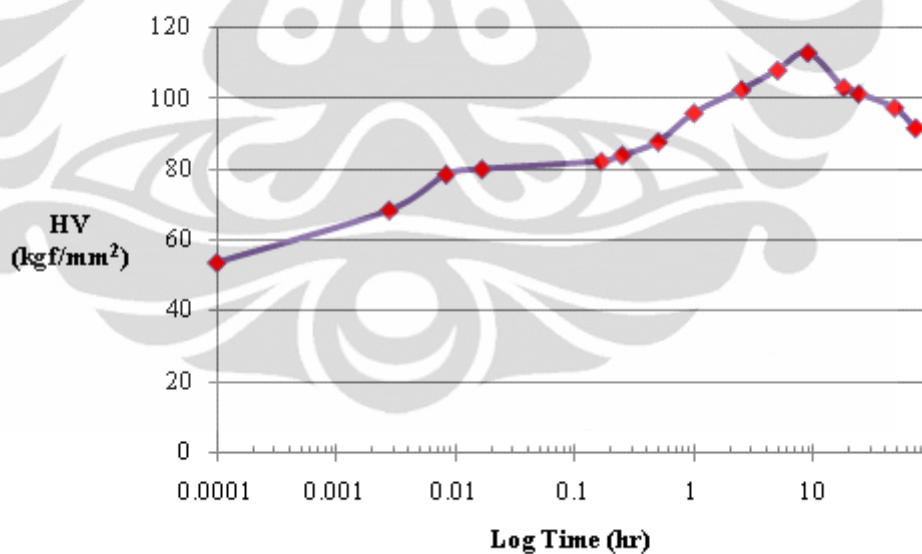


**PADUAN Al-1.7Zn-1.7Mg-0.7Cu (at. %) SELAMA AGEING PADA**  
**TEMPERATUR 190 °C**

Date of Heat treatment : 2/03/2011  
 Solution Treatment : 470°C (90 min on Salt Bath)  
 Ageing Temperature : 190°C (Oil Bath)  
 Load : 3 kgf; dwell time 10 s

Sample No.	Ageing Treatment (min)	Vickers Hardness Value								Average
		1	2	3	4	5	6	7	8	
1	0	54.4	53.7	54	52.3	55.6	52.9	52.8	53.4	53.6375
2	0.166666667	70.8	72.8	73	66.6	71.7	70.5	60	61.9	68.4125
3	0.5	78.1	80.8	78.3	77.1	76.8	80.7	78	78.5	78.5375
4	1	82.5	78.5	78.1	79.4	82.2	79.1	80.2	80	80
5	10	79.9	85.3	84.2	84.8	80.4	80	79.6	83.3	82.1875
6	15	82.1	82.8	82.8	85	84.6	86	84.7	83.3	83.9125
7	30	87.3	88	91	87.6	88	85.5	88	86.1	87.6875
8	60	99.5	94.7	94.3	95.8	95.7	96.9	96.5	93.2	95.825
9	150	100.6	102.9	107.6	101.1	98.9	101.4	102.2	104.5	102.4
10	300	108.4	105.8	108.2	108.9	107	108.2	107	109.5	107.875
11	540	110	113.9	114.8	110.8	114.3	114.1	109.2	115.5	112.825
12	1080	105.9	102.1	104.3	103	101.6	101	104.1	102.4	103.05
13	1440	101.7	101	98	103.3	98.5	101.6	102.4	103.8	101.2875
14	2880	96.9	95.8	98.5	98.6	97.6	96.9	97.2	97.3	97.35
15	4320	91.4	91	91.6	91.7	92.2	92	91.8	91.2	91.6125

**Hardness Curve Al-1.7Zn-1.7Mg-0.7Cu (at. %) after  
Ageing at 190 °C**

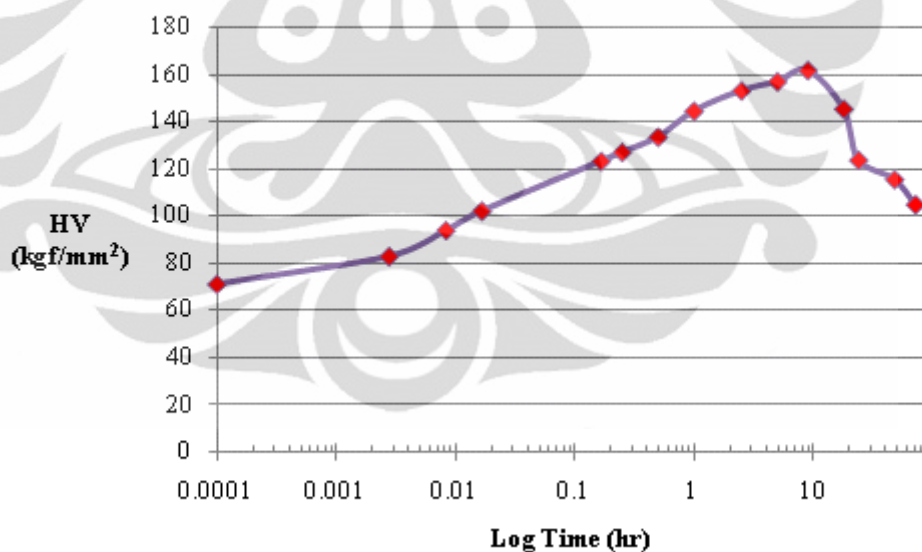


**PADUAN Al-2.9Zn-2.9Mg-0.4Cu (at. %) SELAMA AGEING PADA  
TEMPERATUR 190 °C**

Date of Heat treatment : 2/03/2011  
 Solution Treatment : 470°C (90 min on Salt Bath)  
 Ageing Temperature : 190°C (Oil Bath)  
 Load : 3 kgf; dwell time 10 s

Sample No.	Ageing Treatment (min)	Vickers Hardness Value								Average
		1	2	3	4	5	6	7	8	
1	0	70.7	68.3	67.8	69.1	69.6	71	75.6	75.1	70.9
2	0.166666667	81.1	85.2	84.9	81.4	83	84.3	79.9	82.3	82.7625
3	0.5	95.9	94.8	91.3	96.1	94.3	89.9	94.8	93.6	93.8375
4	1	102	102	102.7	102.4	102	99.8	104.2	101.7	102.1
5	10	125	123.4	123.5	123.6	124.7	120.1	124	122.2	123.3125
6	15	129.4	128.6	131.9	122.8	122.7	129.3	124.9	127.3	127.1125
7	30	136.5	131.5	134.1	133.2	134.5	133.2	134.1	131.7	133.6
8	60	143.5	144.2	143.9	146.6	139.6	143	146.8	149.6	144.65
9	150	153.5	156.9	151.2	153.2	151.8	152.7	151.6	155.6	153.3125
10	300	157.1	158	157.3	157.8	157.7	157.2	156.6	155.9	157.2
11	540	162.5	159.2	159	161.9	164.7	164.6	162.4	161.2	161.9375
12	1080	148.3	146.9	146.6	148.1	143	146	143.6	142.2	145.5875
13	1440	123.3	123.7	123.7	124.7	124.5	122.7	122.9	124.7	123.775
14	2880	111.2	109.8	121.3	117	117.8	116.1	113.9	117.2	115.5375
15	4320	109.8	106	106.2	100.2	104.9	103.3	104	104.2	104.825

**Hardness Curve Al-2.9Zn-2.9Mg-0.4Cu (at. %) after  
Ageing at 190 °C**



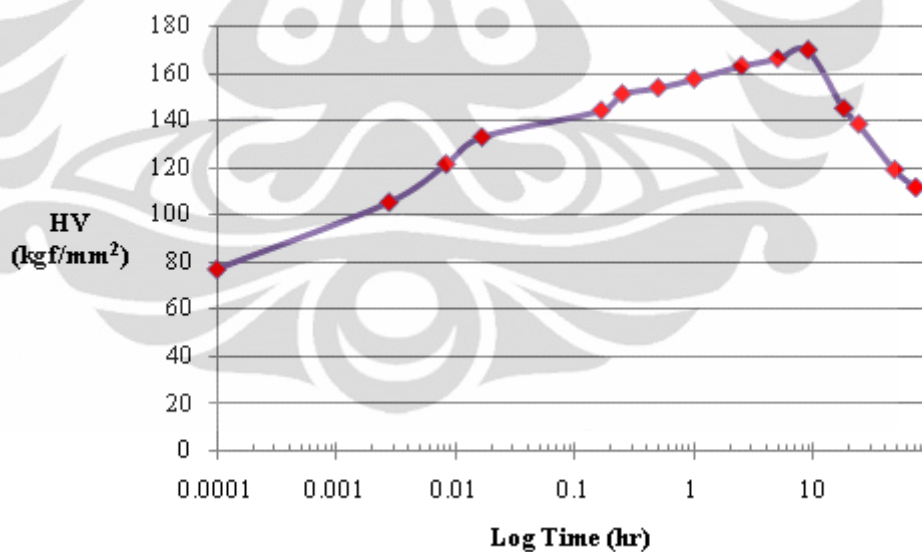


**PADUAN Al-2.9Zn-2.9Mg-0.7Cu (at. %) SELAMA AGEING PADA  
TEMPERATUR 190 °C**

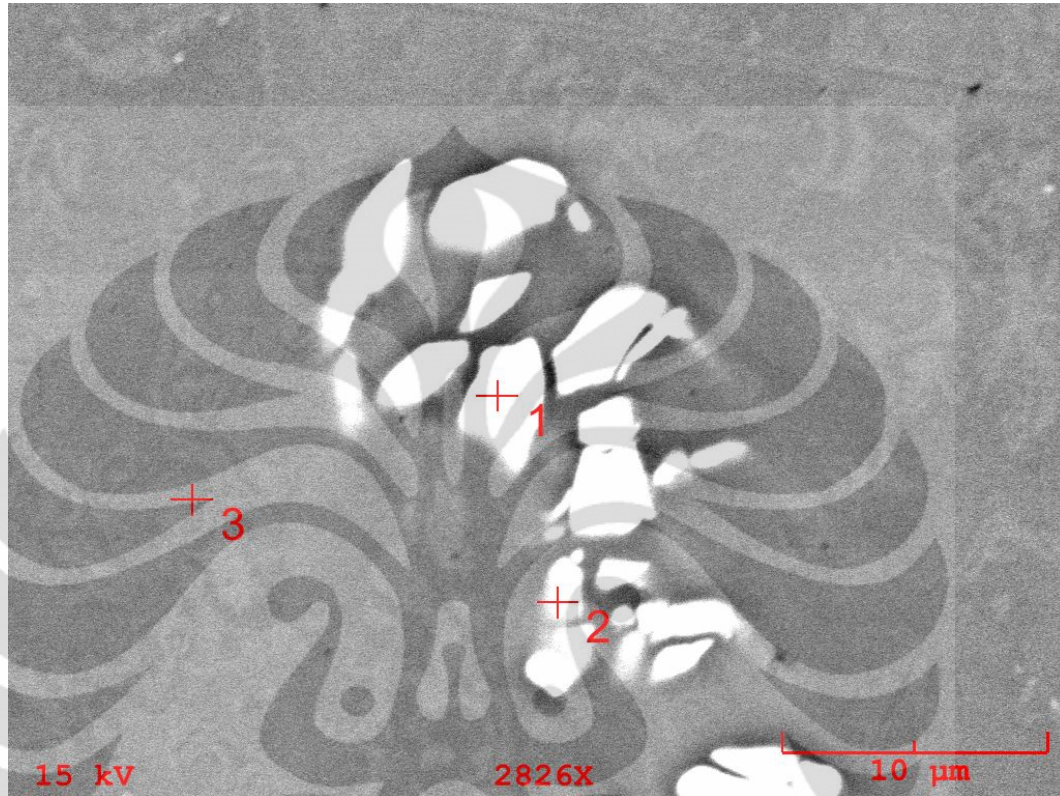
Date of Heat treatment : 2/03/2011  
 Solution Treatment : 470°C (90 min on Salt Bath)  
 Ageing Temperature : 190°C (Oil Bath)  
 Load : 3 kgf; dwell time 10 s

Sample No.	Ageing Treatment (min)	Vickers Hardness Value								Average
		1	2	3	4	5	6	7	8	
1	0	77.5	76.8	75.5	77.1	76	77.1	78.2	76.9	76.8875
2	0.166666667	103.4	102.2	106.6	110.2	100.6	106.9	106	106.1	105.25
3	0.5	120.8	120.6	120.2	122.9	122	120.9	123	121.3	121.4625
4	1	135.8	131.9	136.4	132.6	131.8	133.9	127.2	133.4	132.875
5	10	145	143.8	141	143.9	142.5	148.1	142.8	145.6	144.0875
6	15	152.8	151.6	149.3	151.1	148.8	148.7	153.3	153.2	151.1
7	30	154.1	155.4	155.2	152.3	151.9	154.7	154.5	151.6	153.7125
8	60	156.8	155.6	157.4	158.7	157.6	155	159.9	158.9	157.4875
9	150	165.7	162.7	162	162.8	169.2	162	161.2	158.2	162.975
10	300	164.4	167.8	170.1	167.7	162.5	167.1	164.1	164.4	166.0125
11	540	168.3	171.7	166.1	165.1	174.2	167.7	174.1	170.2	169.675
12	1080	142.2	145.9	147.3	147.8	147.1	145	141	143.6	144.9875
13	1440	138.5	138.8	140	137.8	137.2	137.9	137.8	138.7	138.3375
14	2880	120.5	119.3	120.5	119.8	119.5	116.8	117.8	118.5	119.0875
15	4320	114.7	112	112.2	112.8	112.4	112.2	109.2	106.8	111.5375

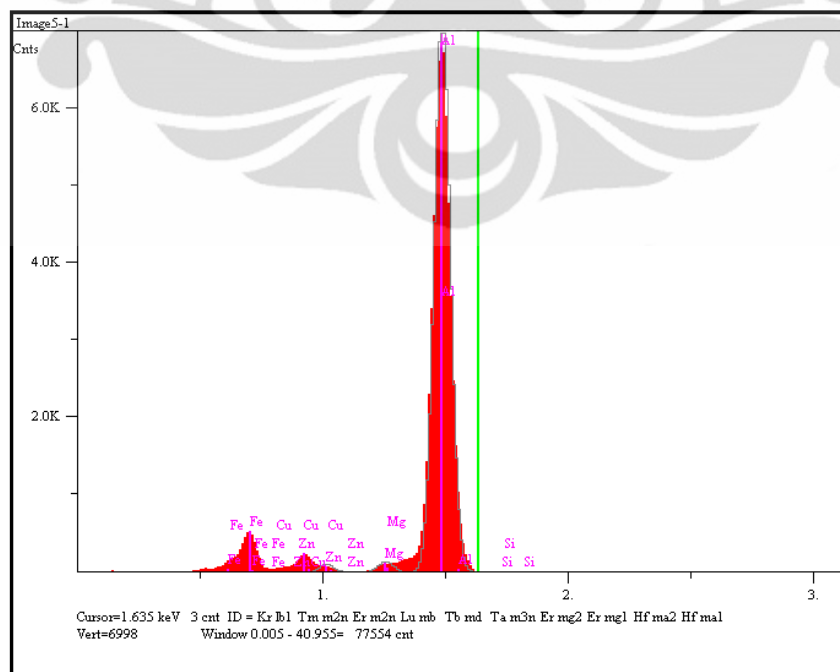
**Hardness Curve Al-2.9Zn-2.9Mg-0.7Cu (at. %) after Ageing at 190 °C**



**LAMPIRAN 6. DATA HASIL PENGUJIAN SEM-EDS PADUAN Al-Zn-Mg-Cu**  
**PADUAN Al-1.7Zn-1.7Mg-0.4Cu (at. %) SELAMA 1 MENIT AGEING**  
**PADA TEMPERATUR 120 °C**



**Titik 1.**

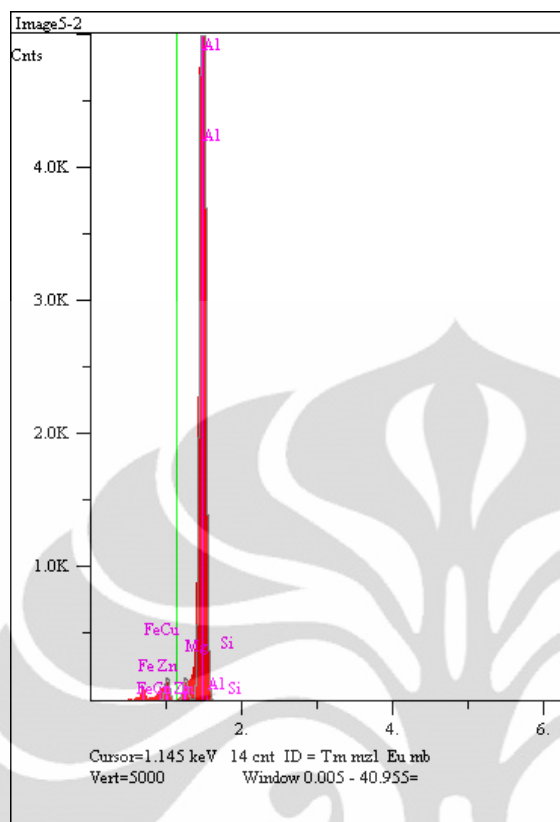


Component	Type	Mole Conc.	Conc.	Units	
Cu	Calc	1.955	4.093	wt.%	
Zn	Calc	0.460	0.991	wt.%	
Fe	Calc	8.707	16.025	wt.%	
Si	Calc	0.157	0.145	wt.%	
Al	Calc	87.058	77.413	wt.%	
Mg	Calc	1.664	1.333	wt.%	
		100.000	100.000	wt.%	Total

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Atomic %	Conc	Units	Error 2-sig	
Mg	Ka	20.84	1.274	1.664	1.333	wt.%	0.081	
Al	Ka	1,163.89	9.523	87.058	77.413	wt.%	0.633	
Si	Ka	1.26	0.313	0.157	0.145	wt.%	0.036	
Fe	Ka	66.22	2.272	8.707	16.025	wt.%	0.550	
Cu	Ka	7.81	0.780	1.955	4.093	wt.%	0.409	
Zn	Ka	1.39	0.329	0.460	0.991	wt.%	0.235	
				100.000	100.000	wt.%		Total

kV 15.0  
 Takeoff Angle 35.0°  
 Elapsed Livetime 51.3  
 Material Classification: èl+x.

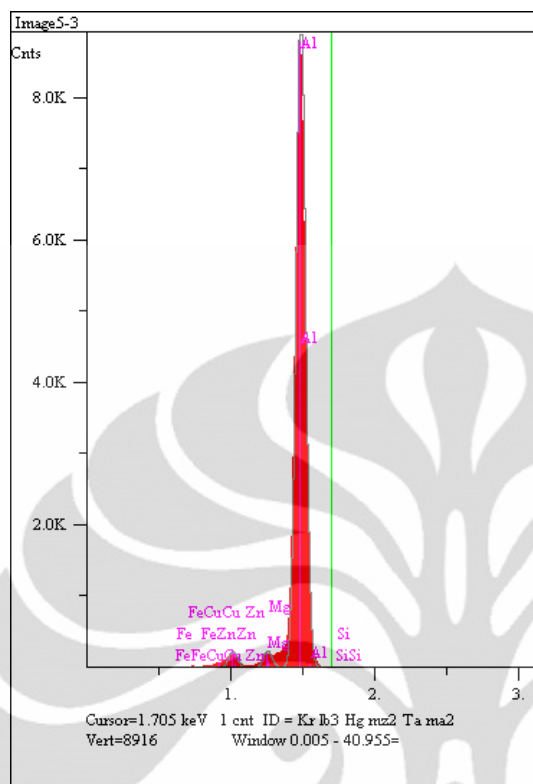
### Titik 2.



Component	Type	Mole Conc.	Conc.	Units	
Cu	Calc	0.602	1.360	wt.%	
Zn	Calc	0.638	1.484	wt.%	
Fe	Calc	2.518	5.000	wt.%	
Mg	Calc	1.833	1.584	wt.%	
Al	Calc	94.373	90.536	wt.%	
Si	Calc	0.035	0.035	wt.%	
		100.000	100.000	wt.%	Total

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Atomic %	Conc	Units	Error 2-sig	
Mg	Ka	32.95	1.743	1.833	1.584	wt.%	0.084	
Al	Ka	1,665.57	12.390	94.373	90.536	wt.%	0.673	
Si	Ka	0.32	0.171	0.035	0.035	wt.%	0.019	
Fe	Ka	22.09	1.427	2.518	5.000	wt.%	0.323	
Cu	Ka	2.80	0.508	0.602	1.360	wt.%	0.247	
Zn	Ka	2.24	0.454	0.638	1.484	wt.%	0.301	
				100.000	100.000	wt.%		Total

kV 15.0  
Takeoff Angle 35.0°  
Elapsed Livetime 43.4  
Material Classification: el+x

**Titik 3.**

Component	Type	Mole Conc.	Conc.	Units	
Cu	Calc	0.063	0.147	wt.%	
Zn	Calc	1.016	2.429	wt.%	
Fe	Calc	0.055	0.113	wt.%	
Mg	Calc	2.182	1.939	wt.%	
Si	Calc	0.046	0.048	wt.%	
Al	Calc	96.637	95.325	wt.%	
		100.000	100.000	wt.%	Total

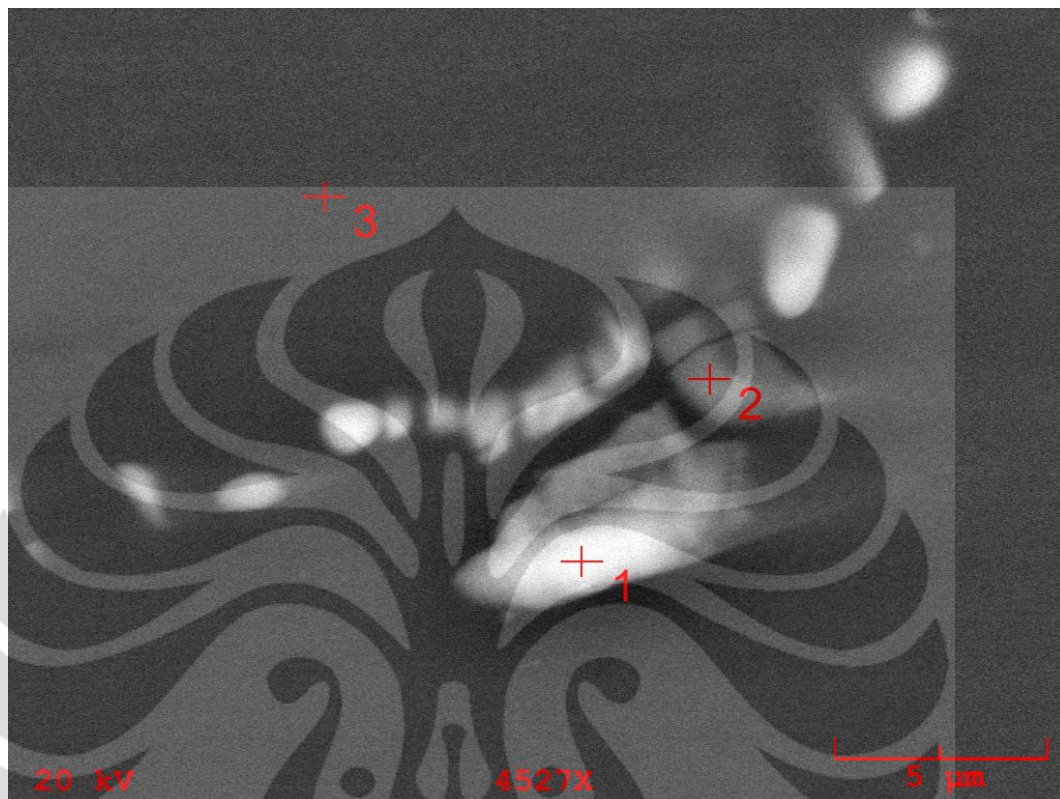
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Atomic %	Conc	Units	Error 2-sig	
Mg	Ka	43.60	2.034	2.182	1.939	wt.%	0.090	
Al	Ka	1,820.56	13.141	96.637	95.325	wt.%	0.688	
Si	Ka	0.42	0.199	0.046	0.048	wt.%	0.023	
Fe	Ka	0.49	0.216	0.055	0.113	wt.%	0.049	
Cu	Ka	0.30	0.169	0.063	0.147	wt.%	0.083	
Zn	Ka	3.63	0.587	1.016	2.429	wt.%	0.393	
				100.000	100.000	wt.%		Total

kV 15.0  
Takeoff Angle 35.0°  
Elapsed Livetime 42.2  
Material Classification: èl+x

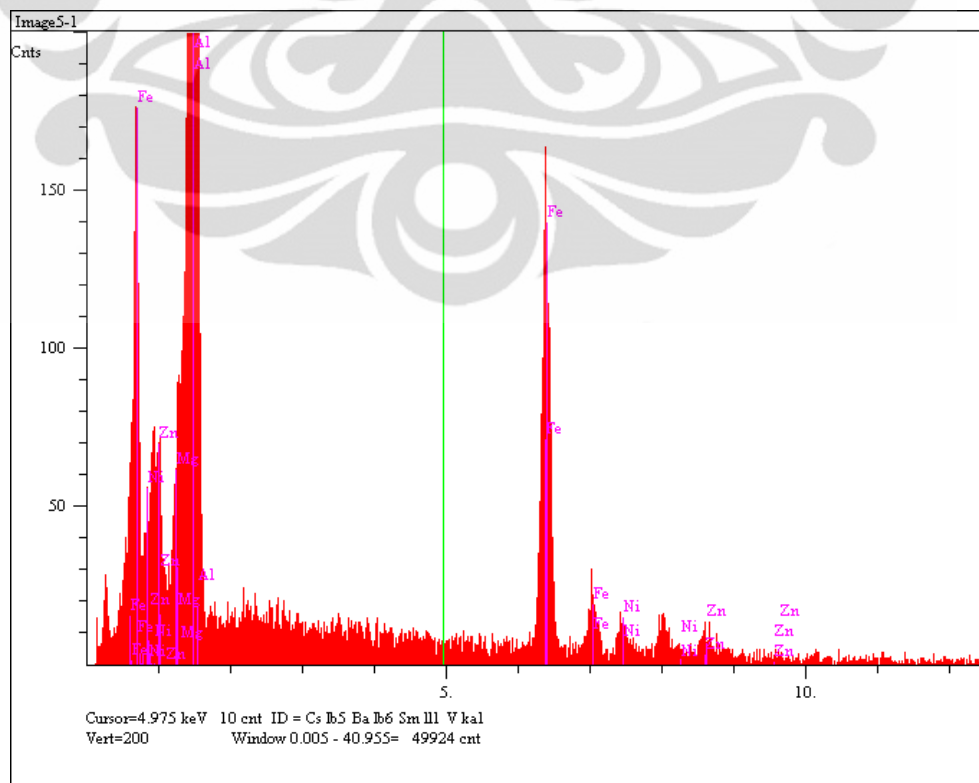




**PADUAN Al-1.7Zn-1.7Mg-0.4Cu (at. %) SELAMA 1 MINGGU AGEING  
PADA TEMPERATUR 120 °C**



**Titik 1.**

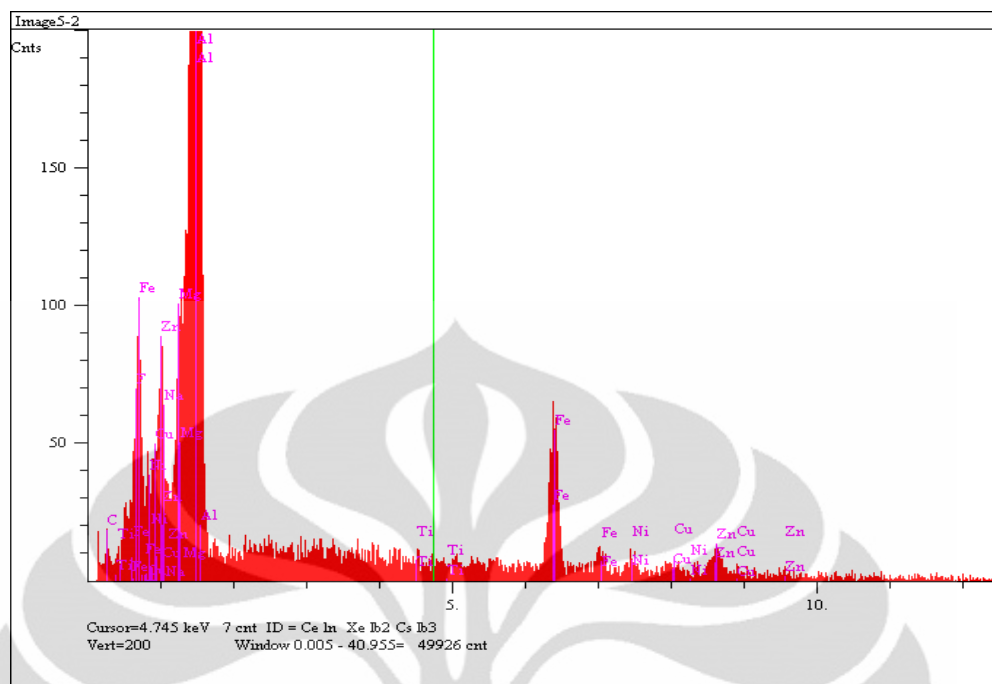


Component	Type	Mole Conc.	Conc.	Units	
C	Calc	4.035	1.693	wt.%	
Ti	Calc	0.074	0.123	wt.%	
Cu	Calc	0.648	1.440	wt.%	
Ni	Calc	0.573	1.175	wt.%	
Zn	Calc	0.552	1.261	wt.%	
Fe	Calc	5.659	11.042	wt.%	
Al	Calc	87.108	82.119	wt.%	
Mg	Calc	1.351	1.147	wt.%	
		100.000	100.000	wt.%	Total

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Atomic %	Conc	Units	Error 2-sig	
C	Ka	0.78	0.345	4.035	1.693	wt.%	0.748	
Mg	Ka	16.63	1.592	1.351	1.147	wt.%	0.110	
Al	Ka	1,205.59	13.554	87.108	82.119	wt.%	0.923	
Ti	Ka	1.26	0.438	0.074	0.123	wt.%	0.043	
Fe	Ka	76.94	3.424	5.659	11.042	wt.%	0.491	
Ni	Ka	6.03	0.959	0.573	1.175	wt.%	0.187	
Cu	Ka	5.91	0.949	0.648	1.440	wt.%	0.231	
Zn	Ka	4.27	0.806	0.552	1.261	wt.%	0.238	
				100.000	100.000	wt.%		Total

kV 20.0  
 Takeoff Angle 28.8°  
 Elapsed Livetime 26.2  
 Material Classification: el+x

### Titik 2.

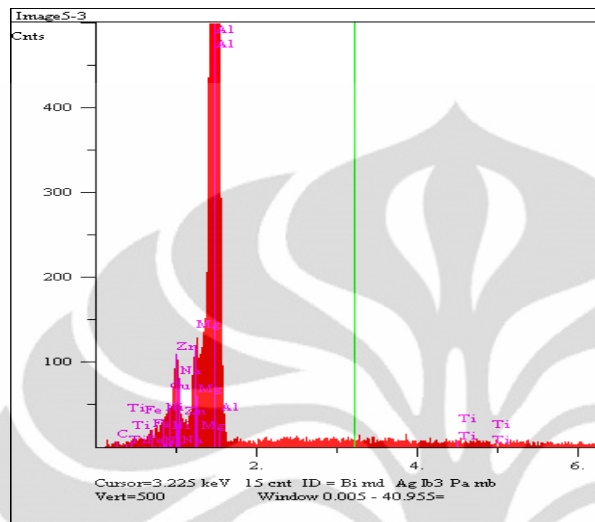


Component	Type	Mole Conc.	Conc.	Units	
C	Calc	0.000	0.000	wt.%	
Ti	Calc	0.076	0.129	wt.%	
Cu	Calc	0.269	0.608	wt.%	
Ni	Calc	0.324	0.676	wt.%	
Zn	Calc	0.777	1.806	wt.%	
Fe	Calc	2.384	4.732	wt.%	
Al	Calc	94.360	90.486	wt.%	
Mg	Calc	1.809	1.563	wt.%	
F	Calc	0.000	0.000	wt.%	
Na	Calc	0.000	0.000	wt.%	
		100.000	100.000	wt.%	Total

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Atomic %	Conc	Units	Error 2-sig	
C	Ka	0.00	0.000	0.000	0.000	wt.%	0.000	
F	Ka	0.00	0.000	0.000	0.000	wt.%	0.000	
Na	Ka	0.00	0.000	0.000	0.000	wt.%	0.000	
Mg	Ka	26.89	2.114	1.809	1.563	wt.%	0.123	
Al	Ka	1,476.19	15.665	94.360	90.486	wt.%	0.960	
Ti	Ka	1.30	0.464	0.076	0.129	wt.%	0.046	
Fe	Ka	32.74	2.333	2.384	4.732	wt.%	0.337	
Ni	Ka	3.50	0.763	0.324	0.676	wt.%	0.147	
Cu	Ka	2.51	0.646	0.269	0.608	wt.%	0.157	
Zn	Ka	6.13	1.010	0.777	1.806	wt.%	0.297	
				100.000	100.000	wt.%		Total

kV 20.0  
 Takeoff Angle 28.8°  
 Elapsed Livetime 24.1  
 Material Classification: èl+x

### Titik 3.



Component	Type	Mole Conc.	Conc.	Units	
C	Calc	0.000	0.000	wt.%	
Ti	Calc	0.105	0.184	wt.%	
Cu	Calc	0.339	0.784	wt.%	
Ni	Calc	0.086	0.183	wt.%	
Zn	Calc	0.987	2.349	wt.%	
Fe	Calc	0.072	0.147	wt.%	
Al	Calc	95.861	94.122	wt.%	
Mg	Calc	2.429	2.148	wt.%	
Na	Calc	0.000	0.000	wt.%	
		99.879	99.917	wt.%	Total

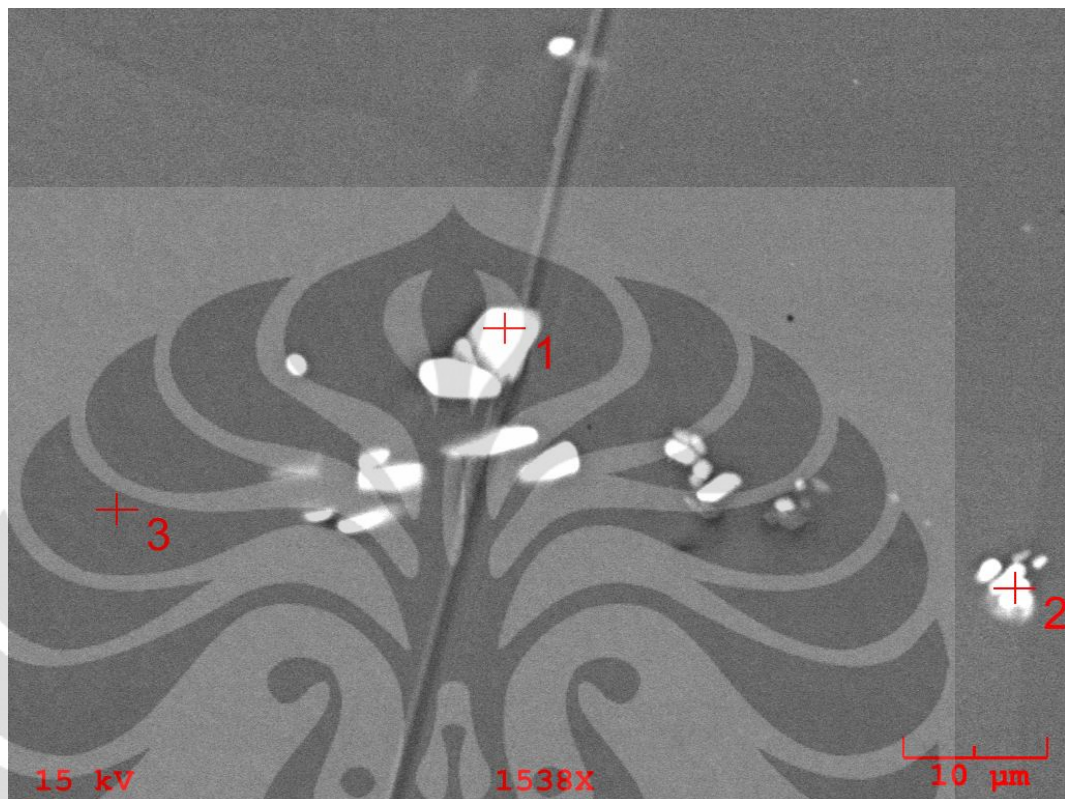
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Atomic %	Conc	Units	Error 2-sig	
C	Ka	0.00	0.000	0.000	0.000	wt.%	0.000	
Na	Ka	0.00	0.000	0.000	0.000	wt.%	0.000	
Mg	Ka	40.76	2.641	2.429	2.148	wt.%	0.139	
Al	Ka	1,625.19	16.674	95.861	94.122	wt.%	0.966	
Ti	Ka	1.83	0.559	0.105	0.184	wt.%	0.056	
Fe	Ka	1.02	0.417	0.072	0.147	wt.%	0.060	
Ni	Ka	0.96	0.405	0.086	0.183	wt.%	0.077	
Cu	Ka	3.25	0.746	0.339	0.784	wt.%	0.180	
Zn	Ka	8.02	1.171	0.987	2.349	wt.%	0.343	
				99.879	99.917	wt.%		Total



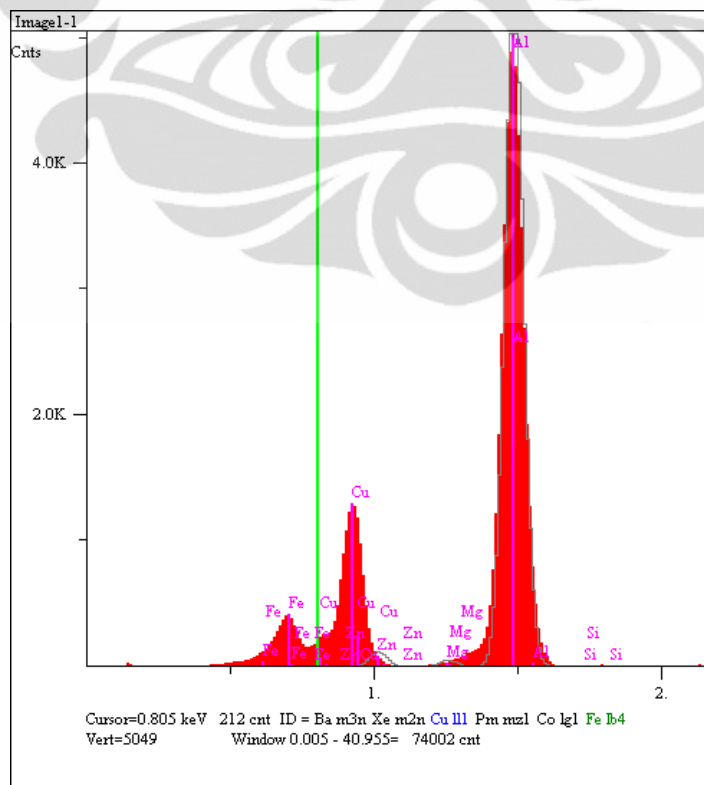
kV 20.0  
Takeoff Angle 28.8°  
Elapsed Livetime 23.4  
Material Classification:  $\text{el+x}$



**PADUAN Al-1.7Zn-1.7Mg-0.7Cu (at. %) SELAMA 1 MINGGU AGEING  
PADA TEMPERATUR 120 °C**



**Titik 1.**

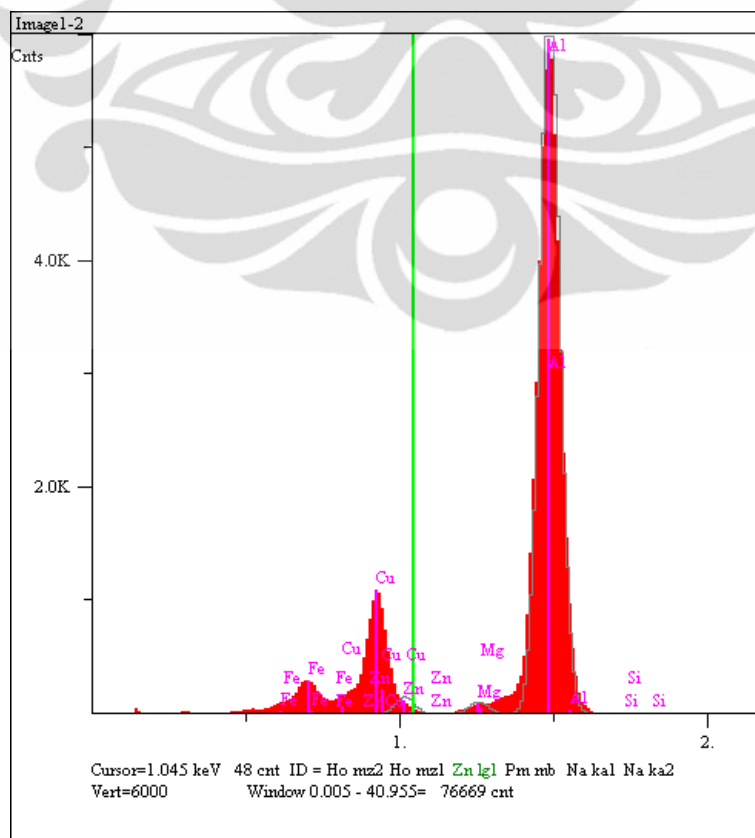


Component	Type	Mole Conc.	Conc.	Units	
Al	Calc	78.998	63.031	wt.%	
Fe	Calc	6.469	10.684	wt.%	
Si	Calc	0.050	0.042	wt.%	
Cu	Calc	13.039	24.502	wt.%	
Mg	Calc	0.864	0.621	wt.%	
Zn	Calc	0.579	1.121	wt.%	
		100.000	100.000	wt.%	Total

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Atomic %	Conc	Units	Error 2-sig	
Mg	Ka	6.52	0.638	0.864	0.621	wt.%	0.061	
Al	Ka	691.65	6.568	78.998	63.031	wt.%	0.599	
Si	Ka	0.32	0.141	0.050	0.042	wt.%	0.019	
Fe	Ka	40.93	1.598	6.469	10.684	wt.%	0.417	
Cu	Ka	41.49	1.609	13.039	24.502	wt.%	0.950	
Zn	Ka	1.39	0.295	0.579	1.121	wt.%	0.237	
				100.000	100.000	wt.%		Total

kV 15.0  
Takeoff Angle 34.0°  
Elapsed Livetime 64.1

## Titik 2.



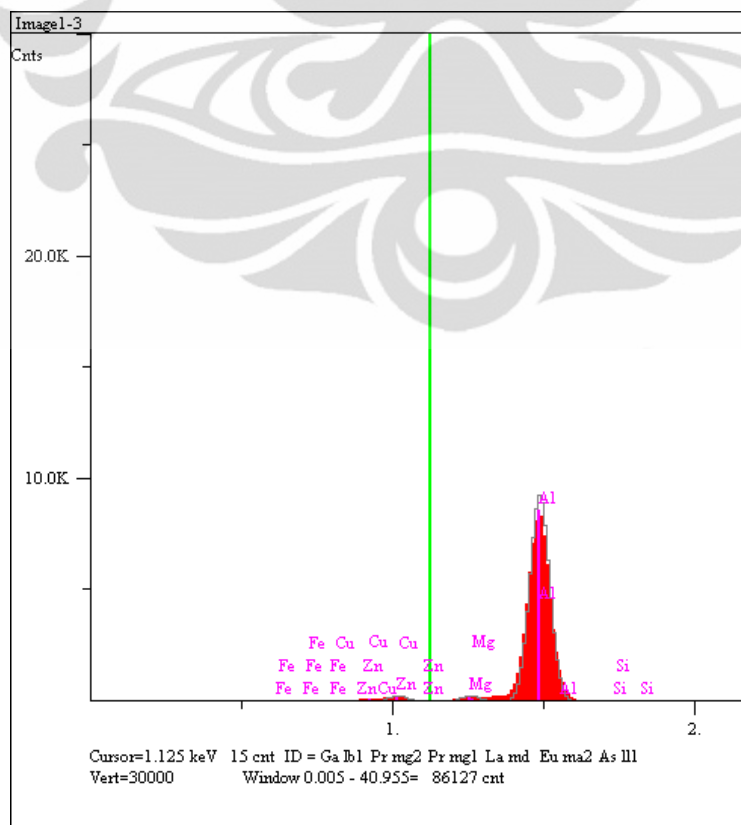
Universitas Indonesia

Component	Type	Mole Conc.	Conc.	Units	
Al	Calc	83.546	70.368	wt.%	
Fe	Calc	4.473	7.799	wt.%	
Si	Calc	0.126	0.110	wt.%	
Mg	Calc	1.494	1.133	wt.%	
Zn	Calc	0.642	1.312	wt.%	
Cu	Calc	9.718	19.278	wt.%	
		100.000	100.000	wt.%	Total

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Atomic %	Conc	Units	Error 2-sig	
Mg	Ka	14.55	1.010	1.494	1.133	wt.%	0.079	
Al	Ka	915.40	8.009	83.546	70.368	wt.%	0.616	
Si	Ka	0.91	0.253	0.126	0.110	wt.%	0.031	
Fe	Ka	32.61	1.512	4.473	7.799	wt.%	0.362	
Cu	Ka	36.01	1.588	9.718	19.278	wt.%	0.850	
Zn	Ka	1.80	0.355	0.642	1.312	wt.%	0.259	
				100.000	100.000	wt.%		Total

kV 15.0  
 Takeoff Angle 34.0°  
 Elapsed Livetime 57.1

### Titik 3.



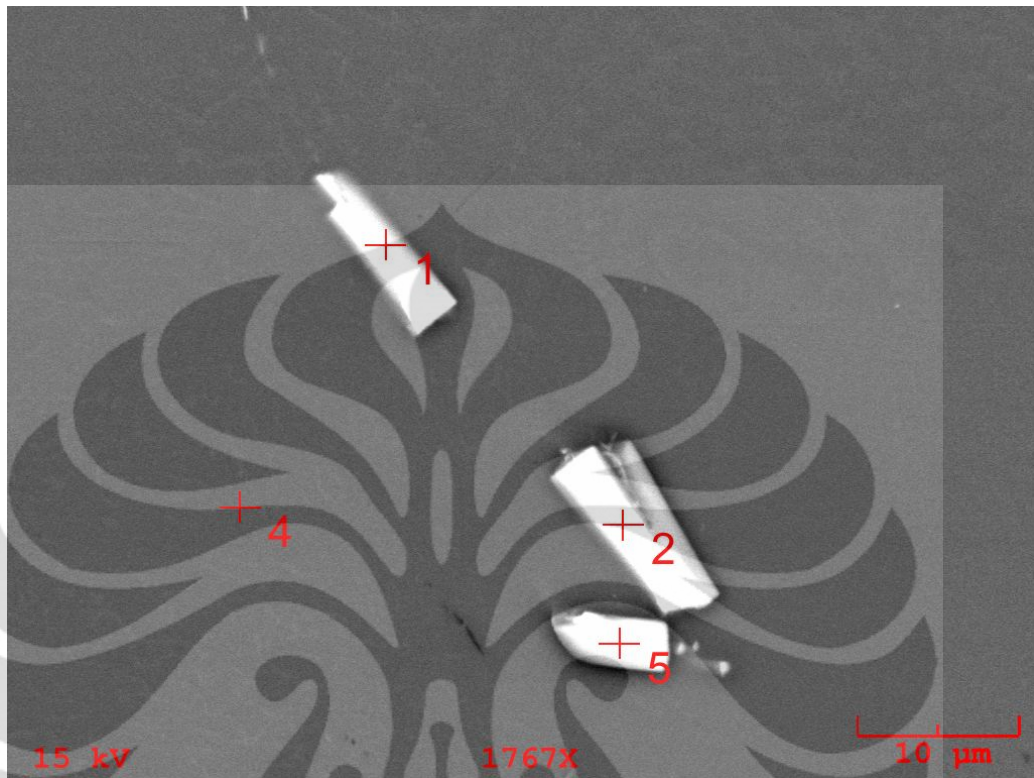
Component	Type	Mole Conc.	Conc.	Units	
Al	Calc	95.814	93.734	wt.%	
Fe	Calc	0.064	0.131	wt.%	
Si	Calc	0.022	0.023	wt.%	
Mg	Calc	2.400	2.115	wt.%	
Zn	Calc	1.251	2.967	wt.%	
Cu	Calc	0.447	1.030	wt.%	
		100.000	100.000	wt.%	Total

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Atomic %	Conc	Units	Error 2-sig	
Mg	Ka	47.00	2.121	2.400	2.115	wt.%	0.095	
Al	Ka	1,805.22	13.145	95.814	93.734	wt.%	0.683	
Si	Ka	0.20	0.140	0.022	0.023	wt.%	0.016	
Fe	Ka	0.59	0.238	0.064	0.131	wt.%	0.052	
Cu	Ka	2.19	0.457	0.447	1.030	wt.%	0.216	
Zn	Ka	4.60	0.663	1.251	2.967	wt.%	0.428	
				100.000	100.000	wt.%		Total

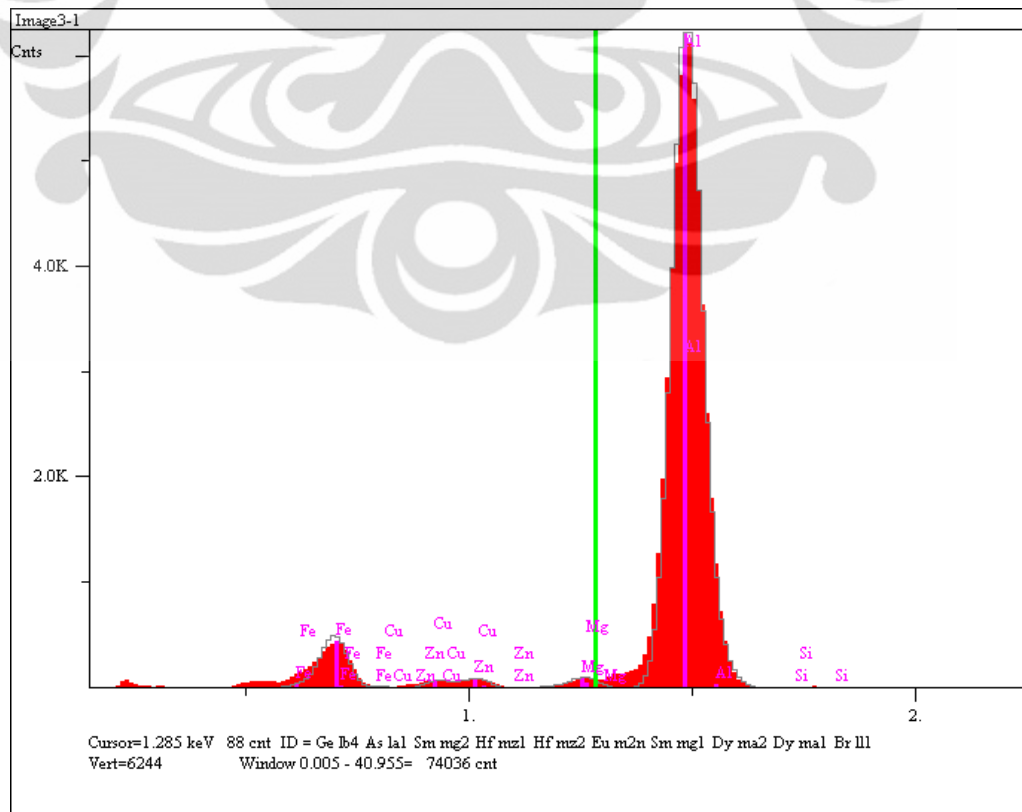
kV 15.0  
 Takeoff Angle 34.0°  
 Elapsed Livetime 41.8



**PADUAN Al-2.9Zn-2.9Mg-0.7Cu (at. %) SELAMA 1 MINGGU AGEING  
PADA TEMPERATUR 120 °C**



**Titik 1.**



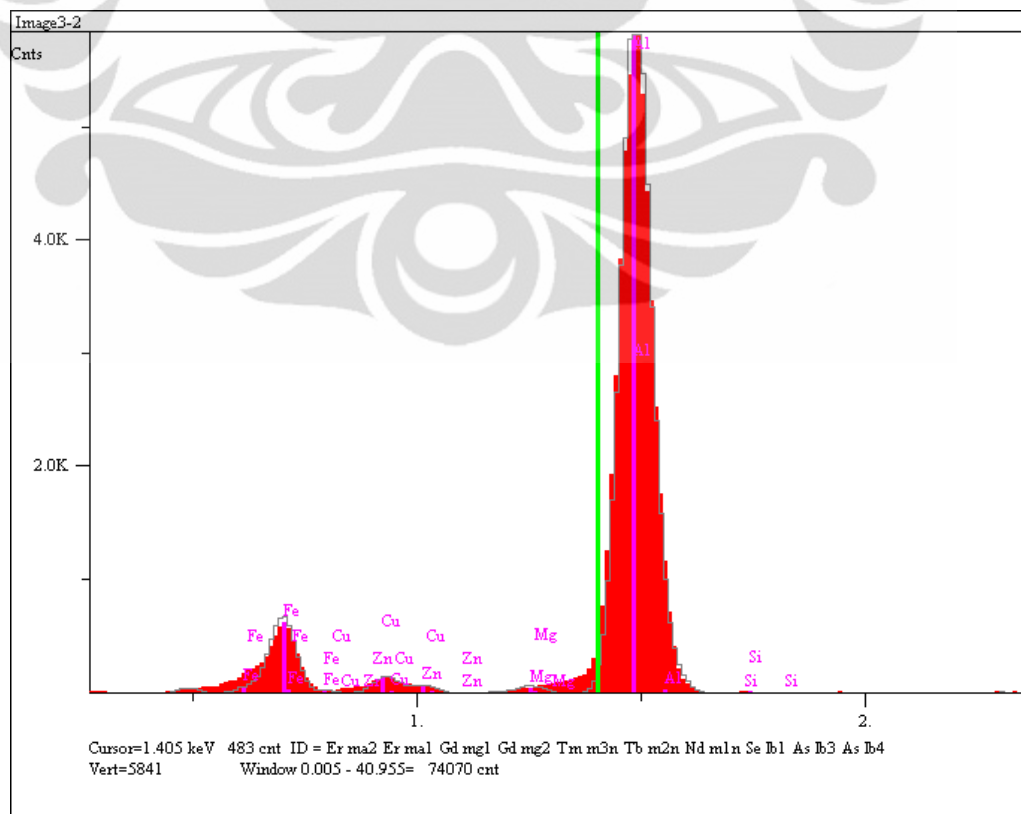
Component	Type	Mole	Conc.	Units
-----------	------	------	-------	-------

		Conc.			
Si	Calc	0.029	0.026	wt.%	
Cu	Calc	1.317	2.640	wt.%	
Zn	Calc	1.020	2.105	wt.%	
Mg	Calc	1.377	1.056	wt.%	
Fe	Calc	13.264	23.366	wt.%	
Al	Calc	78.415	66.742	wt.%	
		95.423	95.934	wt.%	Total

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Atomic %	Conc	Units	Error 2-sig	
Mg	Ka	21.81	1.536	1.377	1.056	wt.%	0.074	
Al	Ka	1,401.55	12.313	78.415	66.742	wt.%	0.586	
Si	Ka	0.34	0.193	0.029	0.026	wt.%	0.014	
Fe	Ka	146.23	3.977	13.264	23.366	wt.%	0.636	
Cu	Ka	7.62	0.908	1.317	2.640	wt.%	0.315	
Zn	Ka	4.47	0.695	1.020	2.105	wt.%	0.328	
				95.423	95.934	wt.%		Total

kV 15.0  
 Takeoff Angle 34.0°  
 Elapsed Livetime 37.0  
 Material Classification: èl+x

## Titik 2.

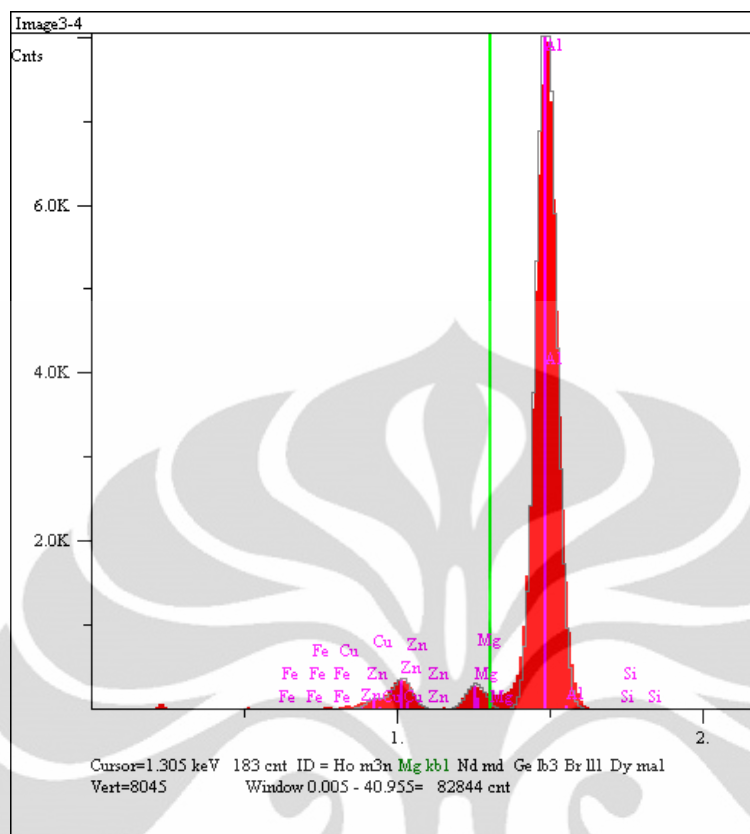


Component	Type	Mole Conc.	Conc.	Units	
Si	Calc	0.146	0.126	wt.%	
Cu	Calc	2.130	4.165	wt.%	
Zn	Calc	0.784	1.578	wt.%	
Mg	Calc	0.962	0.720	wt.%	
Fe	Calc	14.293	24.559	wt.%	
Al	Calc	76.811	63.767	wt.%	
		95.127	94.915	wt.%	Total

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Atomic %	Conc	Units	Error 2-sig	
Mg	Ka	14.82	1.275	0.962	0.720	wt.%	0.062	
Al	Ka	1,351.18	12.174	76.811	63.767	wt.%	0.575	
Si	Ka	1.75	0.438	0.146	0.126	wt.%	0.032	
Fe	Ka	158.93	4.175	14.293	24.559	wt.%	0.645	
Cu	Ka	12.41	1.167	2.130	4.165	wt.%	0.392	
Zn	Ka	3.46	0.616	0.784	1.578	wt.%	0.281	
				95.127	94.915	wt.%		Total

kV 15.0  
 Takeoff Angle 34.0°  
 Elapsed Livetime 36.5  
 Material Classification: èl+x

#### **Titik 4.**

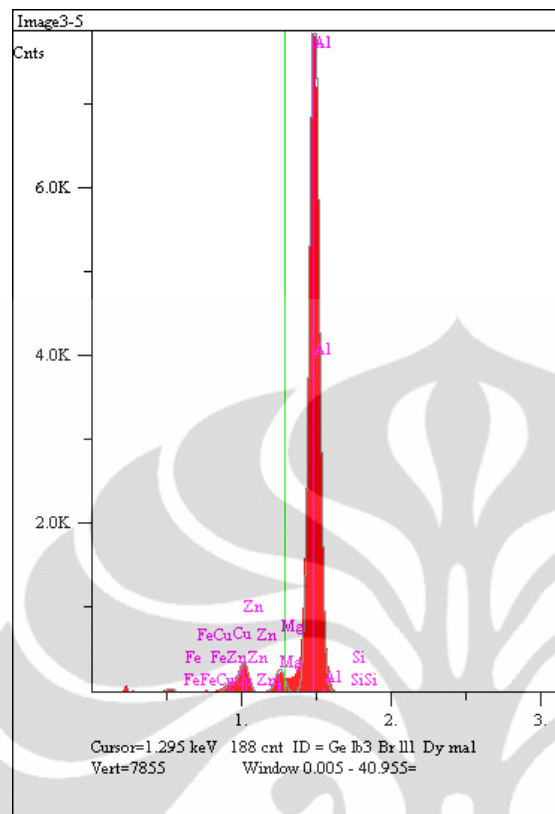


Component	Type	Mole Conc.	Conc.	Units	
Si	Calc	0.078	0.079	wt.%	
Cu	Calc	0.375	0.856	wt.%	
Zn	Calc	2.040	4.799	wt.%	
Mg	Calc	3.177	2.777	wt.%	
Fe	Calc	0.052	0.104	wt.%	
Al	Calc	92.894	90.139	wt.%	
		98.616	98.754	wt.%	Total

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Atomic %	Conc	Units	Error 2-sig	
Mg	Ka	94.60	3.837	3.177	2.777	wt.%	0.113	
Al	Ka	2,737.54	20.640	92.894	90.139	wt.%	0.680	
Si	Ka	1.18	0.428	0.078	0.079	wt.%	0.029	
Fe	Ka	0.78	0.349	0.052	0.104	wt.%	0.047	
Cu	Ka	2.99	0.682	0.375	0.856	wt.%	0.195	
Zn	Ka	12.23	1.380	2.040	4.799	wt.%	0.541	
				98.616	98.754	wt.%		Total

kV 15.0  
Takeoff Angle 34.0°  
Elapsed Livetime 25.7  
Material Classification: òl+x

### **Titik 5.**



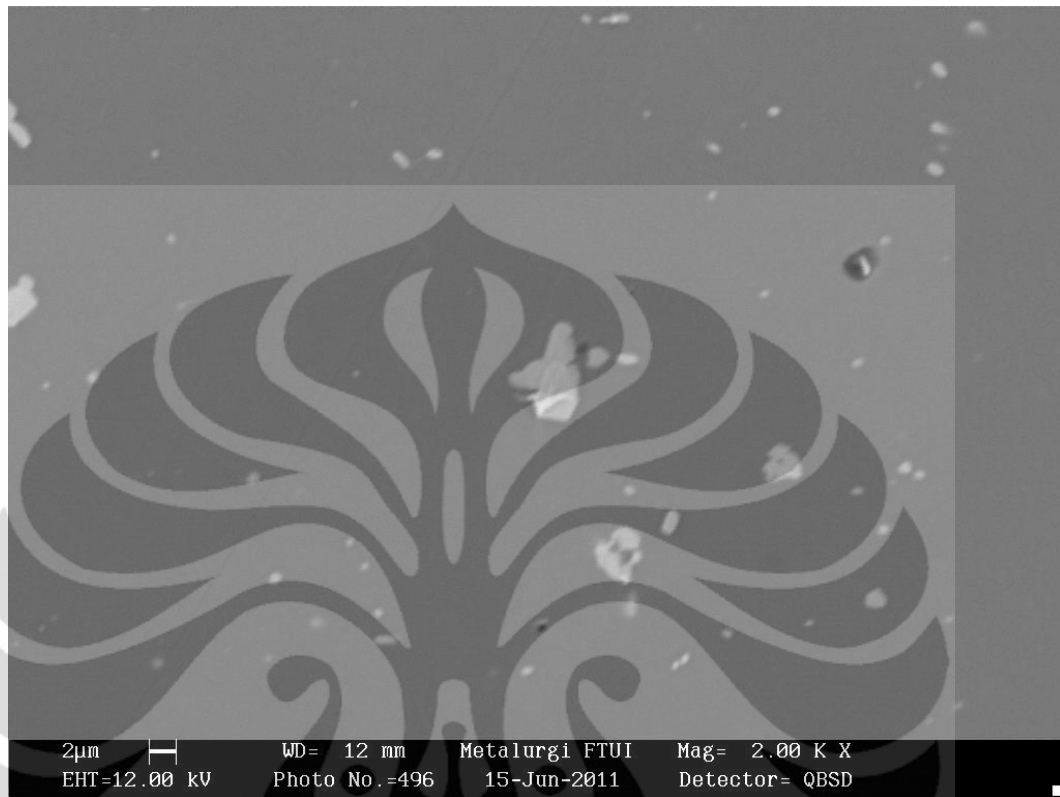
Component	Type	Mole Conc.	Conc.	Units	
Si	Calc	0.067	0.070	wt.%	
Cu	Calc	0.480	1.137	wt.%	
Zn	Calc	2.162	5.269	wt.%	
Mg	Calc	2.760	2.500	wt.%	
Fe	Calc	0.147	0.306	wt.%	
Al	Calc	86.044	86.513	wt.%	
		91.660	95.795	wt.%	Total

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Atomic %	Conc	Units	Error 2-sig	
Mg	Ka	83.39	3.543	2.760	2.500	wt.%	0.106	
Al	Ka	2,625.26	19.882	86.044	86.513	wt.%	0.655	
Si	Ka	1.08	0.403	0.067	0.070	wt.%	0.026	
Fe	Ka	2.32	0.591	0.147	0.306	wt.%	0.078	
Cu	Ka	4.02	0.778	0.480	1.137	wt.%	0.220	
Zn	Ka	13.58	1.430	2.162	5.269	wt.%	0.555	
				91.660	95.795	wt.%		Total

kV 15.0  
Takeoff Angle 34.0°  
Elapsed Livetime 26.6  
Material Classification: èl+x

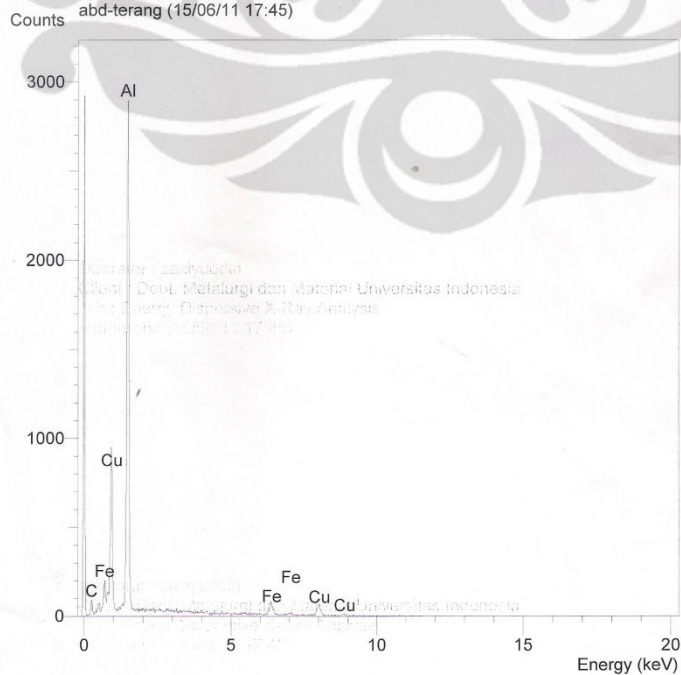


**PADUAN Al-1.7Zn-1.7Mg-1.6Cu (at. %) SELAMA 1 MENIT AGEING  
PADA TEMPERATUR 120 °C**



**TITIK PADA BAGIAN FASA TERANG.**

Operator : zakiyuddin  
 Client : Dept. Metalurgi dan Material Universitas Indonesia  
 Job : Energy Dispersive X-Ray Analysis  
 abd-terang (15/06/11 17:45)



SEMQuant results. Listed at 17:47:08 on 15/06/11  
 Operator: zakiyuddin  
 Client: Dept. Metalurgi dan Material Universitas Indonesia  
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis  
 Spectrum label: abd-terang

System resolution = 60 eV

Quantitative method: ZAF ( 3 iterations).  
 Analysed all elements and normalised results.

Standards :

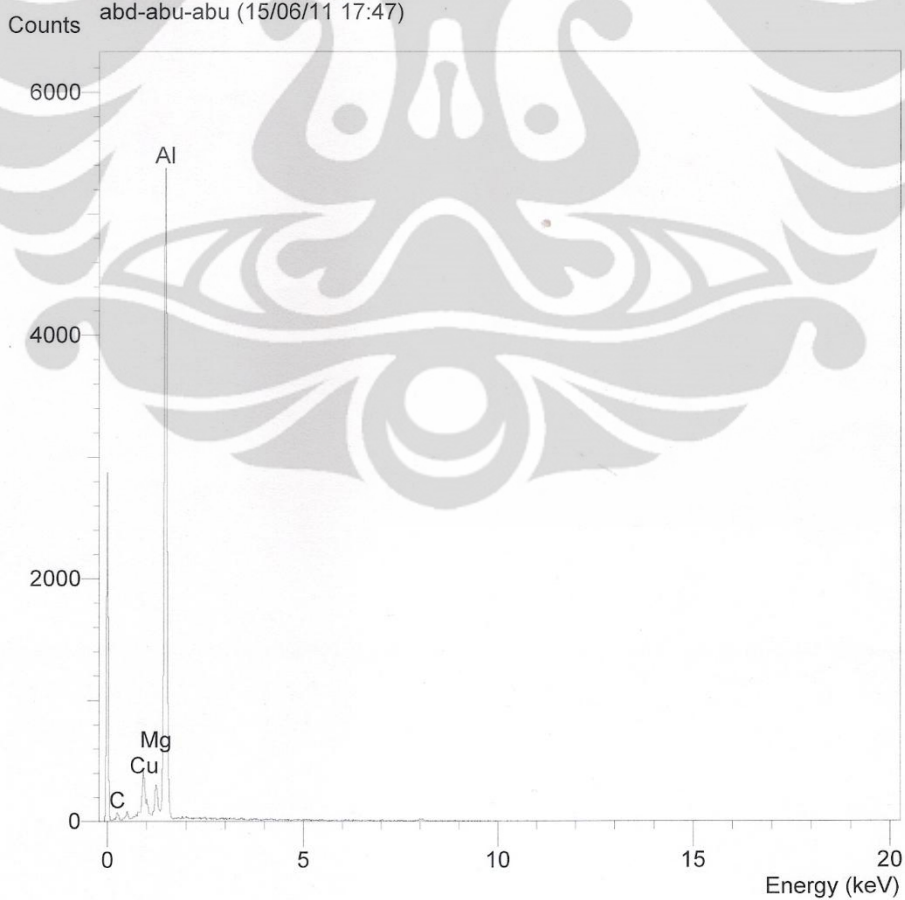
C K Carbon Low 13/09/06  
 Al K AL2O3 20/05/11  
 Fe K FeS2 18/05/11  
 Cu K Copper 18/05/11

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
C K	ED	1.63	4.42
Al K	ED	64.85	78.15
Fe K	ED	4.06	2.36
Cu K	ED	29.46	15.07
Total		100.00	100.00

\* = <2 Sigma

### TITIK PADA BAGIAN FASA ABU-ABU.

Operator : zakiyuddin  
 Client : Dept. Metalurgi dan Material Universitas Indonesia  
 Job : Energy Dispersive X-Ray Analysis  
 abd-abu-abu (15/06/11 17:47)



SEMQuant results. Listed at 17:48:58 on 15/06/11  
 Operator: zakiyuddin  
 Client: Dept. Metalurgi dan Material Universitas Indonesia  
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis  
 Spectrum label: abd-abu-abu

System resolution = 60 eV

Quantitative method: ZAF ( 3 iterations).  
 Analysed all elements and normalised results.

Standards :

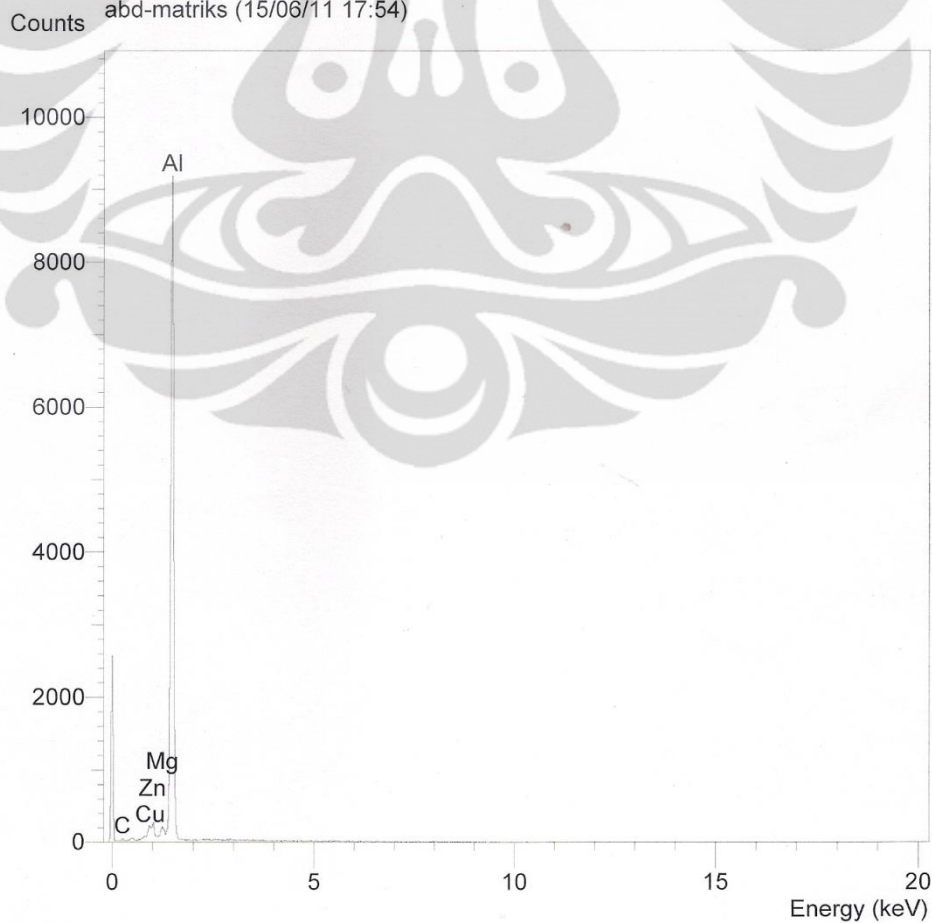
C K Carbon Low 13/09/06  
 Mg K Magnesium Oxide 20/05/11  
 Al K AL2O3 20/05/11  
 Cu K Copper 18/05/11

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
C K	ED	1.89	4.29
Mg K	ED	1.21	1.36
Al K	ED	90.62	91.66
Cu K	ED	6.28	2.70
Total		100.00	100.00

\* = <2 Sigma

### TITIK PADA BAGIAN MATRIKS.

Operator : zakiyuddin  
 Client : Dept. Metalurgi dan Material Universitas Indonesia  
 Job : Energy Dispersive X-Ray Analysis  
 abd-matriks (15/06/11 17:54)



Universitas Indonesia

SEMQuant results. Listed at 17:56:23 on 15/06/11  
Operator: zakiyuddin  
Client: Dept. Metalurgi dan Material Universitas Indonesia  
Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis  
Spectrum label: abd-matriks

System resolution = 61 eV

Quantitative method: ZAF ( 3 iterations).  
Analysed all elements and normalised results.

Standards :

C K Carbon Low 13/09/06  
Al K AL2O3 20/05/11  
Cu K Copper 18/05/11  
Zn L Zinc 18/05/11

Elmt	Spect.	Element	Atomic
	Type	%	%
C K	ED	1.01	2.31
Al K	ED	94.51	95.79
Cu K	ED	1.89*	0.81*
Zn L	ED	2.59	1.08
Total		100.00	100.00

\* = <2 Sigma