



TUGAS AKHIR - TL141584

**PENGARUH TEMPERATUR AGING DAN WAKTU
HOLDING AGING TERHADAP PERUBAHAN
STRUKTUR MIKRO DAN SIFAT MEKANIK PADA
PRESIPITASI *HARDENING* PADUAN Mg-5Al-3.5Ca**

**HAFIZ HERYANSYAH
NRP. 2711 100 128**

Dosen Pembimbing:
Sutarsis, S.T., M.Sc.
Hariyati Purwaningsih, S.Si., M.Si.

**JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015**

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT - TL141584

**EFFECT OF AGING TEMPERATURE AND
HOLDING AGING TIME IN MICROSTRUCTURE
AND MECHANICAL PROPERTIES
TRANSFORMATION ON PRECIPITATION
HARDENING Mg-5Al-3.5Ca ALLOY**

**HAFIZ HERYANSYAH
NRP. 2711 100 128**

Advisor:
Sutarsis, S.T., M.Sc.
Hariyati Purwaningsih, S.Si., M.Si.

**MATERIALS AND METALLURGICAL ENGINEERING
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2015**

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**PENGARUH TEMPERATUR AGING DAN WAKTU
HOLDING AGING TERHADAP PERUBAHAN STRUKTUR
MIKRO DAN SIFAT MEKANIK PADA PRESIPITASI
HARDENING PADUAN Mg-5Al-3.5Ca**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar
Sarjana Teknik

Pada

Bidang Studi Metalurgi Manufaktur
Program Studi S1 Jurusan Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

Hafiz Heryansyah
NRP. 2711100128

Disetujui Oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Sutarsis, S.T., M.Sc. (Pembimbing)
2. Hariyati Purwaningsih, S.Si., M.Si. (Pembimbing)



**Pengaruh Temperatur *Aging* dan Waktu *Holding Aging*
terhadap Perubahan Struktur Mikro dan Sifat Mekanik pada
Presipitasi *Hardening* Paduan Mg-5Al-3.5Ca**

Nama : Hafiz Heryansyah
NRP : 2711100128
Jurusan : Teknik Material dan Metalurgi
Dosen Pembimbing : Sutarsis, S.T., M.Sc.
Hariyati Purwaningsih, S.Si., M.Si.

ABSTRAK

Magnesium (Mg) merupakan material struktur yang ringan dengan nilai densitas sebesar 1.78 g/cm³ dibandingkan dengan material yang biasanya digunakan seperti Aluminium (Al) dan besi (Fe). Sifat lain yang juga dimiliki oleh paduan magnesium adalah konduktivitas termal dan sifat mekanik yang baik serta modulus elastisitas yang tinggi. Karena keunggulannya inilah, banyak industri manufaktur yang mengembangkan magnesium dalam bentuk paduan untuk berbagai aplikasi. Penelitian ini menganalisis pengaruh dari temperatur aging dan waktu holding aging terhadap perubahan struktur mikro dan sifat mekanik melalui perlakuan presipitasi hardening pada unsur Mg, Al, dan Kalsium (Ca) yang dipadukan dengan rasio komposisi 91.5: 5: 3.5. Temperatur aging yang digunakan adalah 250⁰C dan 300⁰C dengan variasi waktu holding selama 12, 24, dan 36 jam. Setelah dilakukan pengujian struktur mikro, difraksi sinar-X, dan hardness didapatkan bahwa fase yang terbentuk adalah Mg, Mg₁₇Al₁₂, Mg₂Ca, dan fase eutektik dari Mg-Mg₁₇Al₁₂ dan Mg-Mg₂Ca serta peningkatan temperatur dan penambahan waktu tahan aging menyebabkan perubahan kuantitas pembentukan dari fase Mg₂Ca dan Mg₁₇Al₁₂ yang berpengaruh terhadap kenaikan dan penurunan nilai kekerasan.

Kata kunci: paduan magnesium, Mg-Al-Ca, presipitasi hardening, aging.



The Effect of Aging Temperature and Holding Aging Time in Microstructure and Mechanical Properties Transformation on Precipitation Hardening Mg-5Al-3.5Ca Alloy

Name : Hafiz Heryansyah
NRP : 2711100128
Department : Materials and Metallurgical Engineering
Lecturer : Sutarsis, S.T., M.Sc.
Hariyati Purwaningsih, S.Si., M.Si.

ABSTRACT

Magnesium (Mg) is a very lightweight structure material with a density value of 1.78 g / cm³ compared with materials that are commonly used such as aluminum (Al) and iron (Fe). Other properties were also owned by the magnesium alloy is a good thermal conductivity and high elasticity modulus. Because of its advantages, many of manufacturing industries develop magnesium alloy for various applications. Magnesium alloy development is done by improving mechanical properties such as hardness and strength. This study analyzed the effect of aging temperature and holding aging time in microstructure and mechanical properties transformation through precipitation hardening treatment for alloyed elements of Mg, Al, and Calcium (Ca) with composition ratio of 91.5: 5: 3.5. Aging temperatures used were 250⁰C and 300⁰C with holding time variations for 12, 24, and 36 hours. The microstructure, X-ray diffraction (XRD), and Hardness testing showed that the phase formed is Mg, Mg₁₇Al₁₂, Mg₂Ca and eutectic phase of Mg-Mg₁₇Al₁₂ and Mg-Mg₂Ca and as well as rising temperature and aging holding time cause changes in the forming quantity of the Mg₂Ca and Mg₁₇Al₁₂ phase that influence a turning value of hardness.

Keywords: Magnesium Alloy, Mg-Al-Ca, Precipitation Hardening, Aging.



KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas segala berkah dan anugerah yang menemani penulis sampai sekarang ini serta kemudahan yang membuat penulis mampu menyelesaikan Tugas Akhir ini yang berjudul **“Pengaruh Temperatur Aging dan Waktu Holding Aging terhadap Perubahan Struktur Mikro dan Sifat Mekanik pada Presipitasi Hardening Paduan Mg-5Al-3.5Ca”**

Tugas akhir ini disusun untuk memenuhi syarat lulus sebagai Sarjana Teknik (ST) Jurusan Teknik Material dan Metalurgi Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT yang senantiasa memberikan segalanya kepada penulis sampai sekarang.
2. Orang tua penulis, Hafdhi dan Eny Ratih yang senantiasa tidak pernah berhenti untuk selalu memberikan dukungan secara moral dan finansial. Dan juga seluruh keluarga yang tak kenal lelah memberikan semangat.
3. Bapak Sutarsis, S.T, M.Sc. selaku dosen pembimbing Tugas Akhir yang senantiasa memberikan bimbingan, motivasi serta dukungan kepada penulis.
4. Ibu Hariyati Purwaningsih, S.Si., M.Si. selaku dosen wali dan dosen pembimbing yang senantiasa mempercayai penulis dari awal kuliah hingga sekarang dan selalu membantu khususnya dalam hal akademik.
5. Bapak Dr. Sungging Pintowantoro selaku Ketua Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI – ITS.
6. Bapak Toto MT11 selaku kakak dan dosen yang selalu memberi pencerahan dan masukan yang sangat membantu dalam penyusunan laporan.
7. Seluruh dosen Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI – ITS.
8. Seluruh karyawan Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI – ITS; Mas Asman, Mas Basuki, Mbak Iis, Pak Tari, Pak

Chanan, Pak Marsono dan karyawan lainnya yang telah banyak membantu penulis selama berkuliah di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI – ITS.

9. Rakhman Patria Sanja sebagai sahabat seperjuangan TA Magnesium yang telah menjadi rekan kerja yang sangat luar biasa
10. Adha Isori, Wira Atmojo Saselah, dan La Ode Nizam Asrim selaku sahabat yang senantiasa menjadi tempat berbagi dalam suka maupun duka selama kuliah.
11. Agis, Denta, Eric, Bakti, dan Ade yang selalu memberikan doa dan supportnya.
12. Teman – teman satu Laboratorium Metalurgi penulis: Teddy, Kevin, Muzaki, Hangga, Yudha, Arief, Hotang, Cikot, Ainun, Pius, Reja, dan Rustam.
13. Matrice Generasi 13, teman-teman satu angkatan 2011 penulis yang juga senantiasa memberikan motivasi, bantuan, serta menjadi keluarga terdekat selama empat tahun terakhir ini.
14. Seluruh Anggota Himpunan Teknik Material dan Metalurgi ITS.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih belum sempurna karena faktor-faktor tertentu, untuk itu penulis mengharap kritik dan saran yang membangun dari berbagai pihak. Besar harapan penulis bahwa tugas akhir penulis dapat memberikan manfaat bagi banyak pihak.

Surabaya, Agustus 2015

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR GAMBAR	xix
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
1.6 Sistematika Penulisan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Magnesium (Mg)	5
2.2 Aluminium	7
2.3 Kalsium (Ca)	8
2.4 Paduan Magnesium	9
2.5 Pengaruh Penambahan Unsur Paduan Pada Magnesium	10

2.6	Pengaruh Elemen Kalsium Pada Paduan Magnesium	13
	
2.7	Paduan Magnesium - Aluminium	15
2.8	Pengerasan Presipitasi (<i>Precipitation Hardening</i>)	17
2.8.1	Solution Treatment	18
2.8.2	Aging	18
2.9	Aplikasi paduan Magnesium	19
2.10	Penelitian Sebelumnya	22
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		
3.1	Bahan Penelitian	25
3.2	Alat Penelitian	25
3.3	Variabel Penelitian	25
3.4	Diagram Alir Penelitian	25
3.5	Prosedur Penelitian	28
3.6	Proses Pengujian	29
3.6.1	Pengujian Struktur Mikro	29
3.6.2	Pengujian Kekerasan	29
3.6.2.1	Metode Vickers	30
3.6.3	Identifikasi Fasa	32
3.7	Rancangan Penelitian	32
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN		
4.1	Analisis Data	35
4.1.1	Hasil Identifikasi Fasa	35
4.1.2	Hasil Pengujian Struktur Mikro	42

4.1.3 Hasil Pengujian Kekerasan49

4.2 Pembahasan51

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

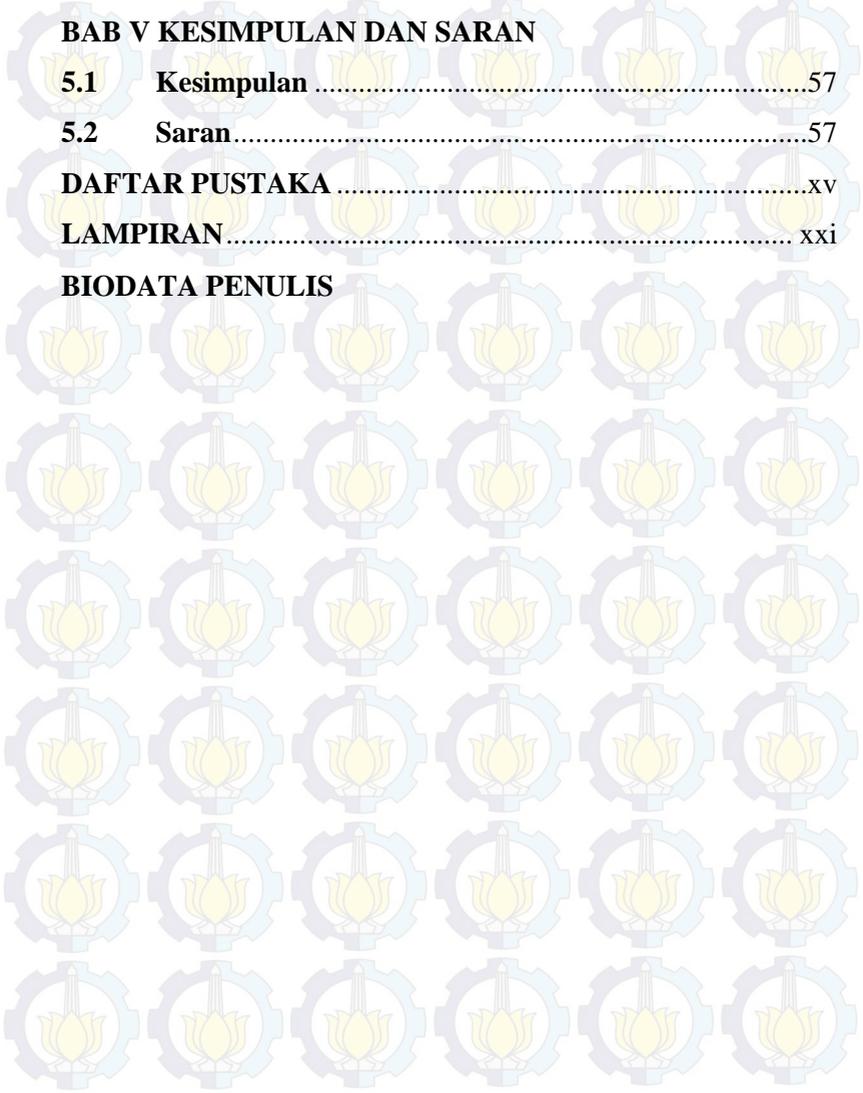
5.1 Kesimpulan57

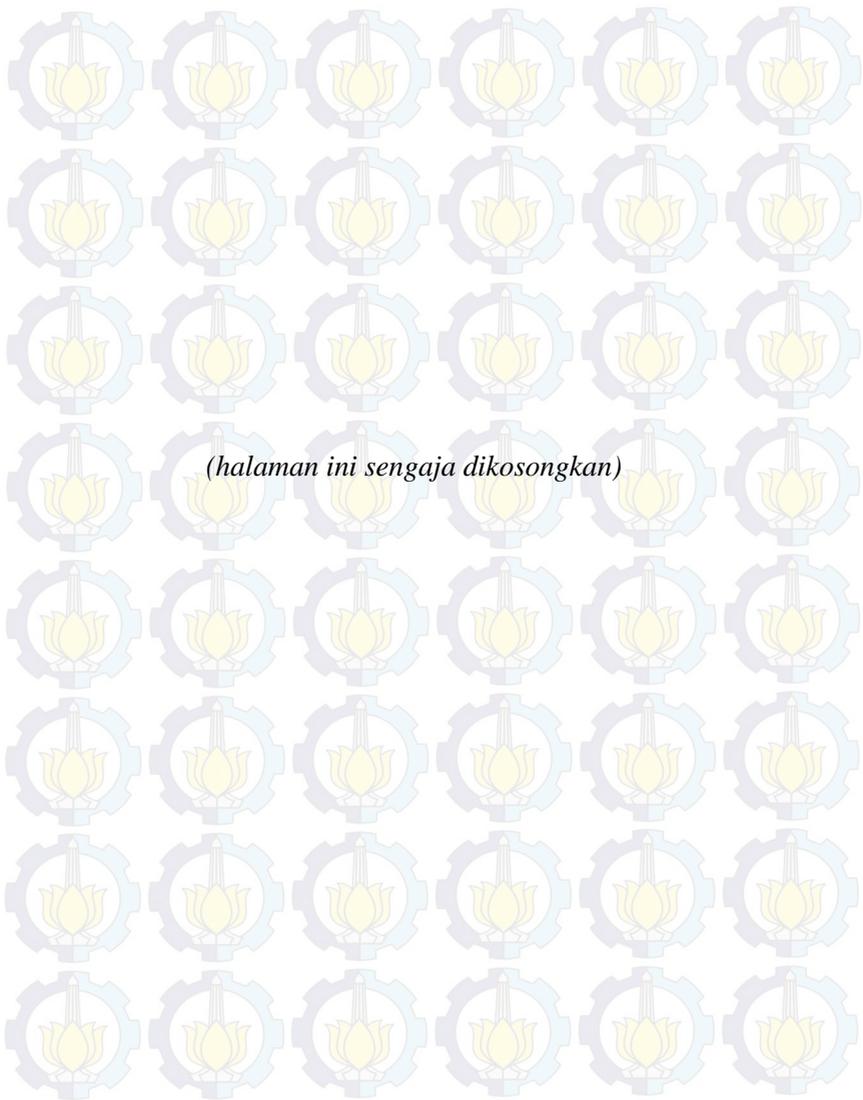
5.2 Saran.....57

DAFTAR PUSTAKAxv

LAMPIRAN xxi

BIODATA PENULIS





(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Properti diagram fasa paduan Mg-Ca.....	14
Gambar 2.2	Diagram fasa Mg-Ca.....	14
Gambar 2.3	Diagram fasa Mg-Al	15
Gambar 2.4	Pengaruh kandungan aluminium terhadap sifat mekanik dari paduan magnesium	16
Gambar 2.5	Kurva tegangan-regangan AZ91, AE42, AM60, AS41, AS21, AM50, dan AM20 dalam yield point	17
Gambar 2.6	Kurva (Siklus Thermal) Pengerasan Presipitasi...18	18
Gambar 2.7	Aplikasi magnesium secara global dalam hal <i>automobiles</i>	21
Gambar 2.8	Kurva hubungan antara <i>Aging Time</i> dan kekerasan.....	22
Gambar 3.1	<i>Flow Chart</i> Metodologi Penelitian.....	27
Gambar 3.2	Profil Temperatur presipitasi <i>Hardening</i> paduan Mg-5Al-3.5Ca	28
Gambar 3.3	Skema pengujian kekerasan dengan metode vickers	31
Gambar 4.1	Grafik hasil pengujian XRD paduan Mg-5Al-3.5Ca pada sampel tanpa perlakuan, solution treatment 8 Jam, dan solution treatment 20 Jam.....	36
Gambar 4.2	Grafik hasil pengujian XRD paduan Mg-5Al-3.5Ca pada temperatur 250 °C dengan variasi waktu tahan 12 jam, 24 jam, dan 36 jam	39

Gambar 4.3 Grafik hasil pengujian XRD paduan Mg-5Al-3.5Ca pada temperatur 300 °C dengan variasi waktu tahan 12 jam, 24 jam, dan 36 jam	41
Gambar 4.4 Struktur mikro paduan Mg-5Al-3.5Ca (a) tanpa perlakuan; (b) <i>solution treatment</i> 8 jam; dan (c) <i>solution treatment</i> 20 jam dengan perbesaran 50x	43
Gambar 4.5 Struktur mikro paduan Mg-5Al-3.5Ca (a) tanpa perlakuan; (b) <i>solution treatment</i> 8 jam; dan (c) <i>solution treatment</i> 20 jam dengan perbesaran 500x.....	44
Gambar 4.6 Struktur mikro paduan Mg-5Al-3.5Ca setelah diberi perlakuan <i>aging</i> pada temperatur 250 °C dengan waktu tahan (a) 12 jam; (b) 24 jam; dan (c) 36 jam dengan perbesaran 100x	45
Gambar 4.7 Struktur mikro paduan Mg-5Al-3.5Ca setelah diberi perlakuan <i>aging</i> pada temperatur 250 °C dengan waktu tahan 12 jam, 24 jam, dan 36 jam dengan perbesaran 500x.....	46
Gambar 4.8 Struktur mikro dengan perbesaran 100x paduan Mg-5Al-3.5Ca <i>aging</i> pada temperatur 300 °C dengan waktu tahan (a) 12 jam; (b) 24 jam; dan (c) 36 jam	47
Gambar 4.9 Struktur mikro paduan Mg-5Al-3.5Ca <i>aging</i> pada temperatur 300 °C dengan waktu tahan 12 jam, 24 jam, dan 36 jam dengan perbesaran 500x.....	48
Gambar 4.10 Grafik nilai kekerasan material Mg-5Al-3.5Ca hasil proses <i>aging</i>	50

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Karakteristik Magnesium	5
Tabel 2.2 Karakteristik Aluminium	8
Tabel 2.3 Karakteristik Kalsium.....	8
Tabel 2.4 Kode ASTM pada unsur paduan Magnesium.....	9
Tabel 2.5 Efek penambahan unsur-unsur paduan magnesium....	11
Tabel 2.6 Densitas Material Struktur Secara Umum	14
Tabel 3.1 Rancangan Penelitian	33
Tabel 4.1 Hasil uji kekerasan sampel aging 250°C dan 300°C dengan waktu tahan 12, 24 dan 36 jam	49



BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Kebutuhan manusia akan teknologi semakin meningkat seiring maraknya inovasi dan pengembangan yang dilakukan secara berkelanjutan terhadap ilmu pengetahuan. Berbagai pihak berlomba-lomba mempublikasikan teknologi yang paling mutakhir buatannya. Hal ini memicu pergerakan secara-besar-besaran dari berbagai sektor perindustrian yang berkepentingan untuk menciptakan teknologi tersebut. Salah satunya adalah industri otomotif. Industri tersebut tengah gencar-gencarnya melakukan pengembangan untuk menciptakan produk yang efisien dalam arti hemat bahan bakar dan ramah lingkungan. Salah satu upaya yang dilakukan adalah dengan mengganti material besi dan baja yang selama ini digunakan dengan material yang lebih ringan. Magnesium adalah yang paling ringan dari semua logam yang umum digunakan dan karena itu sangat menarik untuk industri otomotif (Abu Leil, 2009).

Magnesium (Mg) adalah unsur ke-enam yang sangat melimpah terletak di kerak bumi yang mewakili 2,7 % dari kerak bumi (Okamoto, 1998). Paduan Magnesium adalah salah satu bahan struktur yang ringan, dengan densitas $1,78 \text{ g/cm}^3$, lebih ringan dibandingkan dengan aluminium (Al) dan 70% lebih ringan daripada besi (Ti Jun Chen, 2001). Karena keunggulan sifatnya, banyak industri manufaktur otomotif mengembangkan paduan Magnesium untuk aplikasi *gear box*, piston, pedal, *dashboard*, *framing of doors*, dan lain-lain (Changjiang, 2009).

Pada masa sekarang ini, penggunaan magnesium yang paling banyak digunakan adalah perpaduan antara Mg dan Aluminium (Al) yang menghasilkan paduan Mg-Al. Akan tetapi, paduan tersebut menunjukkan *creep resistance* yang rendah saat berada pada temperatur tinggi dan dengan kandungan Al yang tinggi. Hal ini dikarenakan fase $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ dalam paduan Mg-Al bukanlah penguat yang baik saat berada pada temperatur tinggi.



Laporan Tugas Akhir Jurusan Teknik Material dan Metalurgi

Paduan ini juga memiliki keuletan yang relatif rendah karena putusannya disistribusi fasa primer magnesium dan fasa Mg_2Ca . Untuk itulah, dibutuhkan pengembangan lain dalam paduan Mg. Diantaranya adalah penambahan unsur kalsium (Ca) yang dapat memperbaiki sifat mekanik paduan Mg-Al. Meningkatkan kandungan kalsium dapat menurunkan volume fraksi dari fasa magnesium primer. fasa Mg_2Ca adalah penyebab untuk ketahanan *creep*. Dalam paduan Mg-Al, fasa $Mg_{17}Al_{12}$ adalah penyebab sifat ketahanan *creep* menjadi rendah. Unsur Ca akan menekan fasa $Mg_{17}Al_{12}$ dalam paduan AC515, karena penekanan tersebut disebabkan kombinasi yang kuat dengan atom Ca dan Al. Penambahan Ca untuk paduan AZ91D + 3% Ca dapat membentuk Al_2Ca yang tidak larut menurunkan jumlah dari fasa $Mg_{17}Al_{12}$ dalam matriks. Sedangkan dalam paduan AZ91D + 5% Ca fasa $Mg_{17}Al_{12}$ tidak terlihat hanya ada fasa Al_2Ca yang terlihat (Lee, 2008).

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa salah satu cara yang dapat digunakan untuk memperbaiki sifat mekanik paduan magnesium adalah dengan pengerasan presipitasi. Dalam sebuah studi baru pada pengerasan presipitasi paduan Mg-Zn yang dilakukan oleh Julian M Rosalie, dkk (2012) misalnya, ditemukan bahwa kekuatan luluh dari 273 MPa menggunakan perlakuan panas T6 (solution treatment ditambah *artificial aging*) dapat meningkat menjadi 309 MPa dengan menggunakan perlakuan T8 (solution treatment, cold working dan *artificial aging*). Hal ini disebabkan dislokasi menyediakan nukleasi heterogen untuk presipitat β' , menyebabkan kinetika dipercepat dan memperbaiki ukuran presipitat. Namun belum dibuktikan bagaimana elemen Ca dan proses pengerasan presipitasi dapat mempengaruhi sifat mekanik paduan magnesium. Maka dari itu, perlu dipelajari kembali pentingnya pengaruh penambahan Ca terhadap sifat mekanik dan beberapa sifat lainnya pada paduan magnesium (Mg).

Oleh karena itu dalam penelitian ini akan dilakukan pengembangan proses *precipitation hardening* dengan variasi temperatur *holding*, dan waktu *holding* untuk paduan Mg-5Al



dengan fokus analisis pengaruh penambahan terhadap perubahan struktur mikro dan sifat mekanik.

1.2. Perumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh variasi temperature (T) aging, dan waktu (t) holding aging pada paduan Mg-5Al-3.5Ca terhadap perubahan mikrostruktur dan sifat mekanik?

1.3. Batasan Masalah

Agar diperoleh hasil akhir yang baik dan sesuai dengan yang diinginkan serta tidak menyimpang dari permasalahan yang ditinjau, maka batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Berada pada lingkungan argon sehingga tidak terjadi oksidasi
2. Tidak ada pengotor
3. Pencampuran Mg-Al dan Ca homogen

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan dari diadakannya penelitian ini adalah:

1. Menganalisis pengaruh variasi temperature (T) *aging*, dan waktu (t) *hold aging* pada paduan Mg-5Al-3.5Ca terhadap perubahan mikrostruktur dan sifat mekanik

1.5. Manfaat Penelitian

Penelitian ini bermanfaat untuk:

1. Dijadikan informasi yang saling melengkapi dan komprehensif dengan hasil penelitian-penelitian sebelumnya tentang *precipitation hardening* pada paduan magnesium.
2. Menambah pengetahuan dalam pengembangan paduan material ringan berbasis paduan magnesium pada komponen otomotif



1.6. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan Proposal Tugas Akhir ini disusun sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Berisi tentang latar belakang, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan, manfaat dan sistematika penulisan dari penelitian tugas akhir.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Berisi tentang teori-teori dan penelitian sebelumnya yang menjadi dasar dari penelitian.

BAB III METODOLOGI

Berisi tentang rancangan penelitian termasuk bahan penelitian, peralatan, diagram alir dan pengujian yang dilakukan pada penelitian

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

Berisi tentang pemaparan hasil pengujian dari penelitian yang telah dilakukan dan pembahasan mengenai hasil yang dikaitkan dengan teori atau literatur yang ada

BAB V KESIMPULAN

Berisi kesimpulan yang menjawab tujuan penelitian

DAFTAR PUSTAKA

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Magnesium (Mg)

Magnesium (Mg) adalah unsur keenam yang sangat melimpah keberadaannya dalam kerak bumi, mewakili 2% dari kerak bumi (Okamoto, 1998). Magnesium juga merupakan material yang paling ringan di antara semua logam. Memiliki nilai densitas 1.738 g/cm^3 atau biasa diperkirakan sekitar seperempat kepadatan baja dan dua-pertiga dari aluminium (Neite, 2005). Hal ini membuat magnesium menjadi material yang sering digunakan dalam aplikasi kehidupan sehari-hari. Nilai densitas yang rendah dan kekuatan yang tinggi dari magnesium menjadikannya sebagai pilihan untuk komponen material ringan yang belakangan ini sedang marak digunakan. Adapun karakteristik lain dari magnesium ditunjukkan pada tabel 2.1

Tabel 2.1. Karakteristik Magnesium (Avedesian, 1999)

Simbol	Mg
Nomor Atom	12
Berat Atom	24.3050
Densitas (gr/cm^3)	1,738
Titik Lebur ($^{\circ}\text{C}$)	650
Titik Didih ($^{\circ}\text{C}$)	1091
Konduktivitas Termal ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	156
Termal Ekspansi ($\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	24.8 (pada 25°C)
Modulus Young (GPa)	45
Kekerasan brinell (MPa)	260
Struktur Kristal	Hexagonal Close Packed

Magnesium memiliki *castability* yang baik karena memiliki titik lebur yang rendah sehingga sangat efisien untuk



Laporan Tugas Akhir Jurusan Teknik Material dan Metalurgi

diproduksi dengan cara pengecoran. Magnesium dapat juga dipadukan dengan beberapa unsur untuk meningkatkan sifat mekanik, *machinability*, dan ketahanan korosi. Beberapa unsur paduan utama yang biasa ditambahkan adalah Aluminium (Al), Zinc (Zn), dan *Calcium* (Ca). Magnesium murni tidak dapat digunakan sebagai material struktur maupun otomotif karena memiliki sifat mekanik yang tidak begitu bagus. Agar magnesium dapat digunakan sebagai material struktural, magnesium perlu memiliki kekuatan dan keuletan yang cukup terhadap beban dinamik maupun statis pada temperatur kamar (27°C). Kekuatan dapat dipengaruhi oleh kombinasi mekanisme penguatan seperti *solid solution hardening* dan *precipitation hardening*. Keuletan (*ductility*) magnesium dapat ditingkatkan dengan penghalusan butir (*grain refining*). Penguatan dapat diperoleh dengan penambahan unsur paduan tertentu. Penambahan ini juga mempengaruhi sifat lain seperti titik lebur dan *castability*. Elemen paduan yang sering digunakan adalah seperti aluminium, seng, mangan, zirconium, dan *rare element* (RE) (Garcia, 2010).

Banyak paduan magnesium menunjukkan *machinability* dan *processability* yang baik, dan bahkan bagian paling rumit pada *die-cast* dapat mudah diproduksi. Pada aspek lainnya memiliki sifat redam yang baik, yang membuat pengguna paduan ini lebih menarik untuk meningkatkan siklus hidup mesin. Magnesium murni menunjukkan sifat redam lebih tinggi dibandingkan besi cor (Byron, 1997), sifat ini sangat bergantung pada perlakuan panas. Magnesium memiliki kelemahan untuk aplikasi paduan pada kemampuan kerja dingin dan ketahanan korosi pada paduan magnesium sangat rendah. Disamping itu magnesium sangat reaktif. Pada saat pengecoran, magnesium mengalami pembentukan penyusutan yang tinggi sekitar 4% ,ketika pepadatan dan juga pendinginan sekitar 5% (Norsk,1996). Penyusutan dengan derajat yang tinggi menyebabkan terjadinya *microporosity*, ketangguhan rendah, dan memiliki sensitivitas tinggi yang tidak bisa dihindarkan.



Menurut K. U. Keiner, 2003, kelemahan yang dimiliki tersebut dapat diupayakan dengan peningkatan paduan magnesium yang ditambahkan unsur lain untuk mengurangi kelemahan, pencapaian presipitasi, dan solid solution hardening yang lebih baik. Dengan cara ini semua kelebihan yang dimiliki oleh paduan ini akan terealisasi :

- Sifat mampu cor yang sangat baik
- Spesifikasi yang baik (kekuatan, densitas, rasio)
- Sifat mampu mesin yang baik (pengeboran, pembubutan, pemotongan)
- Peningkatan ketahanan korosi dengan paduan yang memiliki kemurnian tinggi.
- Kemudahan untuk didaur ulang secara terintegrasi
- Kemampuan redam yang baik

2.2. Alumunium

Aluminium merupakan logam ringan yang mempunyai sifat ketahanan korosi yang baik. Aluminium memiliki beberapa kelebihan dibandingkan dengan logam lainnya. Aluminium relatif lebih ringan daripada baja, tembaga, maupun kuningan. Sebagai konduktor listrik dan panas yang baik, Aluminium juga memiliki titik lebur yang rendah, sehingga lebih mudah difabrikasi dibandingkan dengan logam lainnya (Harsono, 2006). Aluminium memiliki sifat tahan korosi yang baik karena fenomena pasivasi. Pasivasi adalah pembentukan lapisan pelindung akibat reaksi logam dengan komponen udara sehingga lapisan tersebut melindungi lapisan dalam logam tersebut dari korosi Selama 50 tahun terakhir ini. Aluminium telah menjadi logam yang luas penggunaannya setelah baja. Hal ini didasarkan karena aluminium memiliki sifat yang ringan, tahan terhadap korosi, serta memiliki kekuatan dan ductility yang cukup baik, mudah diproduksi dan cukup ekonomis (Gusti Randa Atmaja, 2011). Adapun karakteristik lain dari aluminium ditunjukkan pada tabel 2.2.



Tabel 2.2. Karakteristik Aluminium

Simbol	Al
Nomor Atom	13
Berat Atom	26.98
Densitas (gr/cm ³)	2,7
Titik Lebur (°C)	660
Titik Didih (°C)	2520
Konduktivitas Termal (W m ⁻¹ K ⁻¹)	237
Termal Ekspansi (μm·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	23.1 (pada 25 °C)
Modulus Young (GPa)	70
Kekerasan brinell (Mpa)	245
Struktur Kristal	Face Centered Cubic

2.3. Kalsium (Ca)

Kalsium adalah logam putih perak yang agak lunak dan melebur pada 845°C saat terserang atmosfer dan udara lembab, Pada reaksi ini akan terbentuk kalsium oksida dan/atau kalsium hidroksida. Kalsium menguraikan air dengan membentuk kalsium hidroksida dan hidrogen. Kalsium bereaksi membentuk kation kalsium[II] (Ca²⁺) saat dalam larutan air garam dan biasanya berupa bubuk putih dan membentuk larutan yang tidak berwarna kecuali anionnya. (Vogel, 1979). Dibawah ini adalah tabel dari karakteristik dari kalsium antara lain:

Tabel 2.3 Karakteristik Kalsium

Simbol	Ca
Nomor Atom	20
Berat Atom	40.08
Densitas (gr/cm ³)	1.55
Titik Lebur (°C)	838
Titik Didih (°C)	1440



Konduktivitas Termal ($W m^{-1} K^{-1}$)	201
Termal Ekspansi ($\mu m \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	22.3 $\mu m \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ (pada 25 °C)
Modulus Young (GPa)	20
Kekerasan brinell (Mpa)	167
Struktur Kristal	Face Centered Cubic

2.4. Paduan Magnesium

Karena tidak cukup kuat dalam bentuk yang murni, magnesium sering dipadukan dengan berbagai elemen untuk mendapatkan sifat khusus tertentu, terutama kekuatan dengan rasio berat yang tinggi. Sifat-sifat mekanik magnesium, terutama kekuatan tarik, memiliki nilai yang sangat rendah. Oleh karena itu, magnesium murni jarang digunakan untuk aplikasi industri. Paduan magnesium pada umumnya akan memiliki sifat-sifat mekanik yang lebih baik jika dipadukan dengan unsur-unsur lain. Elemen paduan yang sering digunakan diantaranya adalah aluminium, seng, dan mangan.

Untuk mengidentifikasi paduan magnesium menggunakan standar ASTM, masing-masing paduan ditandai dengan huruf yang menunjukkan elemen paduan utama dan diikuti dengan presentase berat unsur paduan. Tabel 2.2 menunjukkan simbol huruf pada setiap unsur paduan.

Tabel 2.4. Kode ASTM pada unsur paduan Magnesium (Keiner, 2003)

Huruf Singkatan	Unsur Paduan	Huruf Singkatan	Unsur Paduan
A	Aluminium	N	Nikel
B	Bismut	P	Timbal
C	Tembaga	Q	Perak
D	Kadmium	R	Krom



E	Tanah Jarang	S	Silikon
F	Besi	T	Timah
H	Thorium	W	Yttrium
K	Zirconium	Y	Antimon
L	Litium	Z	Zinc
M	Mangan		

Contoh pada paduan AZ19D dimana menjelaskan unsur aluminium (A) yang terkandung adalah 9% dan Zinc (Z) yang terkandung adalah 1% serta huruf terakhir pada paduan ini menjelaskan tahap perkembangan paduan ini yaitu 4 (D). Sesuai dengan spesifikasi DIN yaitu MgAl₁₉Zn1. Pada paduan magnesium ASTM menentukan standar komposisi (nilai berat %): Al 8.3-9.7; Zn 0.35-1.0; Si maks 0.1; Mn maks 0.15; Cu maks 0.3; Fe maks 0.005; Ni maks 0.002; unsur lainnya 0.02. Unsur yang perlu diperhatikan yaitu unsur besi, nikel dan tembaga karena dapat mengurangi ketahanan korosi (Keiner, 2003).

2.5. Pengaruh Penambahan Unsur Paduan Pada Magnesium

Cara yang paling efektif untuk meningkatkan kekerasan, kekuatan dan keuletan dari magnesium adalah dengan menambahkan elemen paduan. Peningkatan sifat mekanik ini dapat dipengaruhi secara langsung dengan meningkatkan kandungan unsur zat terlarut, ataupun secara tidak langsung misalnya dengan efek penghalusan butir, dan pengembangan fasa intermetalik. Paduan digunakan untuk meningkatkan sifat mampu bentuk dari campuran dan hasil pengecoran. Paduan yang umum digunakan pada magnesium adalah zinc dan aluminium. Mangan, zirkonium, silikon, dan *rare earth element* akan mempengaruhi sifat paduan secara signifikan. Berikut dibawah ini adalah tabel pengaruh adanya penambahan unsur paduan pada magnesium (Mg) antara lain :



Tabel. 2.5. Efek penambahan unsur-unsur pada paduan magnesium (Gupta, dkk 2011)

Unsur	Efek
Aluminium	Penambahan unsur ini dapat meningkatkan kekerasan dan kekuatan. Hal ini juga meningkatkan kemampuan cor (system eutektik, $T_E = 437^\circ\text{C}$). Paduan lebih dari 6% berat aluminium dapat dipanaskan.
Berilium	Berilium hanya digunakan untuk leleh dengan jumlah yang kecil (<30 ppm). Tambahan unsur dapat mengurangi permukaan leleh oksidasi secara signifikan selama pengecoran, pelelehan, dan proses pengelasan. Dapat juga menghasilkan pengkasaran butir.
Kalsium	Kalsium memiliki efek positif pada ketahanan <i>creep</i> dan penghalusan butir (<i>grain refinement</i>). Ketika kalsium digabungkan melalui pengecoran paduan dapat mengurangi leleh oksidasi dan juga oksidasi selama proses <i>heat treatment</i> . Disisi lain, kalsium (0.3 wt%) dapat menyebabkan pelekatan pada alat selama pengecoran dan <i>hot cracking</i> .
Cerium	Tambahan cerium dapat meningkatkan <i>elongation</i> secara signifikan.
Tembaga	Dapat meningkatkan temperature kamar dan kekuatan pada temperature tinggi. Dapat mengurangi ketahanan korosi.



Laporan Tugas Akhir Jurusan Teknik Material dan Metalurgi

Litium	Secara relative memiliki kelarutan padat yang tinggi, mengurangi densitas, dan meningkatkan keuletan. Bagaimanapun, litium memiliki efek negative yang sangat kuat yaitu dapat membakar dan sifat penguapan pada saat terjadi leleh.
Mangan	Diatas 1.5 berat% mangan, meningkatkan kekuatan tarik. Unsur ini, dapat meningkatkan ketahanan korosi terutama di air garam.
Tanah Jarang	Dapat meningkatkan kekuatan temperature tinggi, ketahanan <i>creep</i> dan ketahanan korosi
Silikon	Kemampuan cor yang rendah, tetapi ketahanan <i>creep</i> dapat ditingkatkan dengan pembentukan <i>stable silazide</i> .
Perak	Unsur ini digunakan sebagai penghubung tanah jarak yang dapat meningkatkan kekuatan temperature tinggi dan ketahanan mulur.
Thorium	Penambahan unsur ini dapat meningkatkan kekuatan mulur diatas 370°C. Pada paduan yang mengandung zink, unsur thorium dapat meningkatkan kemampuan pengelasan Unsur ini termasuk radiaktif.
Timah	Timah bersama aluminium di dalam paduan magnesium dapat meningkatkan keuletan.
Yttrium	Unsur ini memiliki <i>solid solubility</i> yang tinggi di magnesium. Dapat meningkatkan kekuatan temperature tinggi dan ketahanan mulur.



Zink	Unsur sebagai penghubung aluminium untuk meningkatkan kekuatan tanpa adanya pengurangan keuletan. Penambahan di atas 3% Zn, penyusutan dapat di kompensasi dan kekuatan tarik meningkat.
Zirkonium	Penambahan unsur ini mempengaruhi peningkatan kekuatan tarik tanpa pengurangan keuletan, karena adanya afinitas oksigen.

2.6. Pengaruh Elemen Kalsium Pada Paduan Magnesium

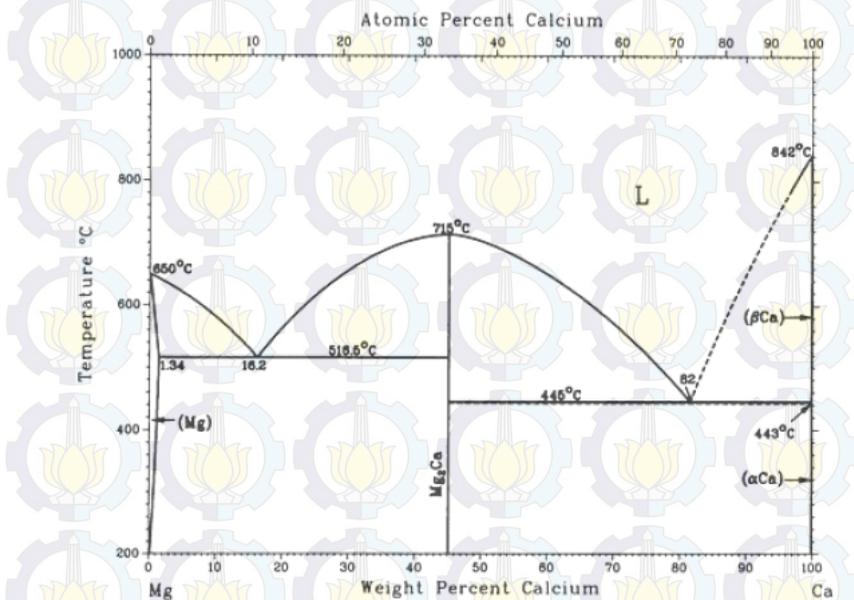
Pemaduan dengan Ca dalam jumlah 0.01% hingga 3% menjadi lebih umum dalam pengembangan yang terjangkau untuk mendapatkan ketahanan creep pada paduan Mg-Al. Dasarnya dari pemaduan ini adalah untuk menggantikan fasa β -Mg₁₇Al₁₂ didalam paduan Mg-Al (Horst, dkk 2006). Pada paduan Mg-5Zn-5Sn yang mengandung Ca sebesar 1.5% menunjukkan hasil kekuatan luluh dan sifat creep yang optimal. Maksimum UTS (*ultimate tensile strength*) adalah 174.7 MPa dan nilai elongasinya adalah 4.79 % pada temperatur ruangan, sedangkan pada temperatur 150°C nilai UTS yang didapatkan adalah 147.9MPa dan elongasinya adalah 14.21 %. Hal ini terjadi pada saat penambahan paduan Mg-5Zn-5Sn dengan kandungan Ca sebesar 0.5% (M.Yang, L.Cheng dan F.Pan,2010). Mikrostruktur dari paduan Mg-Ca ditandai dengan terputus-putusnya distribusi fasa primer magnesium dan fasa Mg₂Ca. Dengan meningkatkan kandungan kalsium dapat menurunkan fraksi volume dari fasa primer magnesium. Adanya fasa Mg₂Ca adalah sangat mempengaruhi ketahanan *creep* (Shibayama, 2010). Didalam paduan Mg-Al, fasa Mg₁₇Al₁₂ menjadi penyebab sifat *creep* menjadi rendah. Ca akan menekan fasa Mg₁₇Al₁₂ didalam paduan AC515 karena penekanan ini disebabkan oleh kuatnya kombinasi dengan atom Ca dan Al (Dunqiang, 2011).



Laporan Tugas Akhir
Jurusan Teknik Material dan Metalurgi

Phase	Composition, wt% Ca	Pearson symbol	Space group
(Mg)	0	<i>hP2</i>	<i>P6₃/mmc</i>
Mg ₂ Ca	45.2	<i>hP12</i>	<i>P6₃/mmc</i>
(βCa)	100	<i>cI2</i>	<i>Im$\bar{3}$m</i>
(αCa)	100	<i>cF4</i>	<i>Fm$\bar{3}$m</i>

Gambar 2.1 Properti diagram fase paduan Mg-Ca (ASM Metal Handbook vol.3)

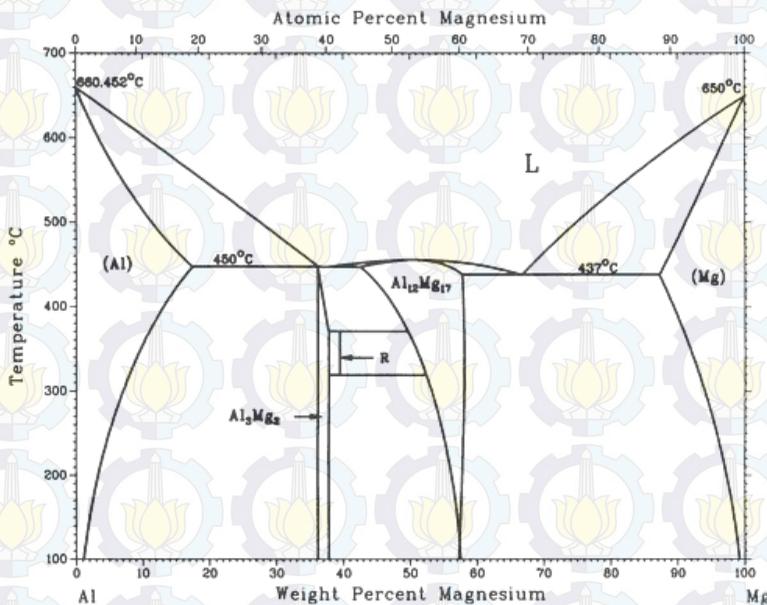


Gambar 2.2 Diagram fase Mg-Ca (ASM Metal Handbook vol.3)



2.7. Paduan Magnesium - Aluminium

Batas kelarutan maksimum aluminium dalam magnesium adalah mulai dari 2% sampai 12.6wt%, dengan temperatur eutektik sebesar 437°C . Pada diagram fasa magnesium-aluminium ditunjukkan bahwa ada reaksi eutektik antara fasa magnesium primer (α Mg) dan fasa intermetalik β ($\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$). fasa - β terbentuk pada saat temperatur 437°C dengan kadungan aluminium sekitar 33wt%. Pengamatan pada struktur eutektik di dalam pengecoran mengindikasikan adanya solidifikasi struktur yang meta-stabil atau tidak equilibrium. Sebaliknya, solidifikasi struktur mikro yang equilibrium akan menyebabkan paduan ini terdiri dari 100% magnesium primer.



Gambar 2.3 Diagram fasa Mg-Al (ASM Metal Handbook vol.3)

Fasa - β terbentuk selama proses pendinginan pengecoran dan akan menyebabkan munculnya presipitat pada batas butir. Fasa

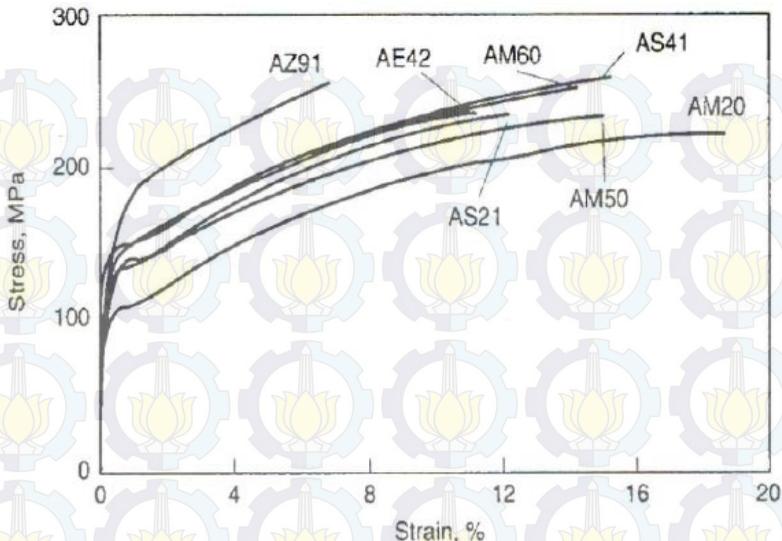


Laporan Tugas Akhir Jurusan Teknik Material dan Metalurgi

- β intermetalik sangat getas dan dapat mengurangi keuletan, tetapi juga akan meningkatkan kekerasan pada paduan tersebut. Jumlah dari fasa - β tergantung dari laju pendinginan proses pengecoran dan jumlah aluminium yang diberikan. Dengan kandungan aluminium yang tinggi akan membuat paduan memiliki *ultimate tensile* dan *yield strength* yang tinggi pula (Sharifi, 2012). Sebagai contoh, untuk paduan AM60 yang mengandung aluminium sekitar 6%, akan menghasilkan nilai kekuatan tarik yang rendah dibandingkan dengan paduan AZ91 yang memiliki paduan aluminium sebesar 9%. Nilai elongasi yang lebih tinggi juga akan menyebabkan *fracture*. Pada paduan dengan kandungan aluminium yang rendah, cenderung akan menyebabkan turunnya proses peningkatan pengerasan dan *yield point* (Emley, 1996). Dibawah ini adalah tabel pengaruh kandungan aluminium terhadap sifat mekanik dari paduan magnesium.

Alloy	Al (wt. %)	Density (g/cm ³)	Ultimate Tensile Strength (MPa)	Tensile Yield Strength (MPa)	Compressive Yield Strength (MPa)	Elongation to fracture (%)
Pure Mg	-----	1.745	90	21	-----	2-6
AZ91	8.3-9.7	1.81	240	160	165	3
AM60	5.5-6.5	1.80	225	130	130	8
AM50	4.4-4.5	1.77	210	125	110	10
AS20	1.7-2.5	1.78	190	90	90	12.6

Gambar 2.4 Pengaruh kandungan aluminium terhadap sifat mekanik dari paduan magnesium (Emley, 1996)

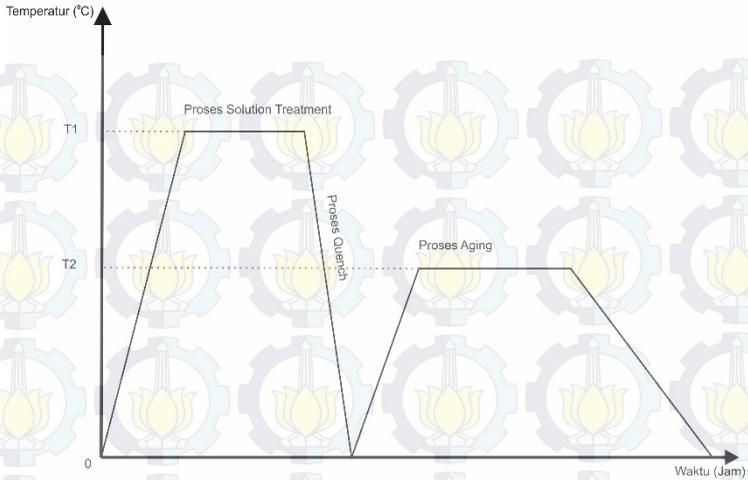


Gambar 2.5 Kurva tegangan-regangan AZ91, AE42, AM60, AS41, AS21, AM50, dan AM20 dalam *yield point* (Avedesian, dkk 1999).

2.8. Pengerasan Presipitasi (*Precipitation Hardening*)

Proses pengerasan presipitasi atau *Precipitation Hardening* merupakan sebuah teknik perlakuan panas yang berfungsi untuk meningkatkan kekuatan luluh, maka dari itu biasanya proses pengerasan presipitasi digunakan pada material yang lunak (*malleable*). Beberapa material yang biasanya menggunakan proses *Precipitation Hardening* adalah aluminium, magnesium, nikel, titanium, dan beberapa baja tahan karat.

Pengerasan presipitasi bergantung pada perubahan antara *solid solubility* dengan temperatur untuk menghasilkan partikel halus dari fase pengotor yang dapat menghambat pergerakan dislokasi. Dislokasi seringkali disebut sebagai penyebab terjadinya plastisitas, sehingga hal itu berfungsi untuk mengeraskan material. Zat pengotor pada logam ini berfungsi sebagai penguat seperti pada komposit.



Gambar 2.6 Kurva (Siklus Thermal) Pengerasan Presipitasi

2.8.1. Solution Treatment

Sebuah proses di mana sebuah paduan atau logam dipanaskan sampai suhu yang sesuai, kemudian ditahan pada temperatur tertentu dengan waktu yang cukup lama untuk memungkinkan sebuah fase tertentu untuk masuk ke dalam larutan padat, dan kemudian didinginkan dengan cepat untuk menahan fase dalam larutan. Kebanyakan proses *solution treatment* berfungsi untuk melunakkan atau anil.

2.8.2. Aging

Beberapa logam diklasifikasikan sebagai logam hasil dari pengerasan presipitasi. Ketika paduan pengerasan presipitasi didinginkan dengan cepat, unsur-unsur dari paduan tersebut akan terjebak dalam larutan, sehingga logam menjadi lunak. *Aging* adalah sebuah "*solutionized*" logam yang akan memungkinkan elemen paduan untuk menyebar secara mikro dan membentuk partikel intermetalik. Partikel-partikel intermetalik akan mengalami nukleasi dan keluar dari larutan yang selanjutnya akan bertindak sebagai fase yang berfungsi untuk memperkuat, sehingga



dapat meningkatkan kekuatan paduan. Ada paduan yang mungkin mengalami proses *aging* secara alami yang berarti bahwa ada endapan yang dapat terbentuk pada suhu kamar atau paduan tersebut juga mungkin mengalami proses *artificial aging* ketika terdapat endapan yang hanya bisa terbentuk pada temperatur tinggi. Dalam beberapa aplikasi, paduan *natural aging* (*aging* secara alami) dapat disimpan dalam *freezer* untuk mencegah pengerasan sampai setelah dilakukan proses lebih lanjut.

Contoh aplikasi dari pengerasan presipitasi pada paduan logam terdapat pada seri 2000, seri 6000, dan seri 7000 aluminium *alloy*, serta beberapa *superalloy* dan beberapa baja tahan karat. Baja yang mengeras oleh penuaan biasanya disebut sebagai *maraging steels*, dari kombinasi istilah "penuaan martensit."

2.9. Aplikasi Paduan Magnesium

Penggunaan magnesium sebagai material untuk memenuhi kebutuhan manusia berada di peringkat ketiga setelah baja dan aluminium. Walaupun magnesium tidak ditemukan dalam bentuk unsurnya berupa biji tetapi senyawa magnesium dapat ditemukan diseluruh dunia. Senyawa yang paling umum adalah magnesit ($MgCO_3$), dolomit ($MgCO_3 \cdot CaCO_3$), karnalit ($KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$) dan juga terdapat di air laut (Neite, dkk, 2005). Magnesium adalah mineral yang paling berlimpah terlarut ketiga di dalam air laut (1.1 Kg/m^3). Magnesium merupakan material yang paling ringan dari semua logam. Memiliki densitas sebesar 1.74 g/cm^3 , kira-kira seperempat kepadatan baja dan dua-pertiga dari aluminium (Calister, 2003). Magnesium memiliki densitas yang rendah dan secara spesifik memiliki sifat mekanik yang tinggi. Sehingga material yang berbasis material ringan banyak sekali di aplikasikan untuk kebutuhan sehari-hari.



Tabel 2.6 Densitas Material Struktur Secara Umum

Material	Densitas (g/cm³)
Baja (Besi cor)	7.2
Titanium	4.51
Aluminium	2.71
Magnesium	1.74
Struktur Plastik	1.0-1.7

Paduan magnesium banyak diaplikasikan di kehidupan sehari-hari, beberapa aplikasinya yaitu digunakan dalam hal :

- Komponen Otomotif (stir mobil, rangka mobil, *crankcase*, dll)
- Komponen pesawat (*gearbox*, *engines*, *casing* helikopter, dll)
- Aplikasi medis (pengganti tulang)
- Peralatan olahraga
- Perangkat elektronik (*casing* laptop dll)
- Aplikasi optik
- Alat-alat kerja (gergaji, penembak paku, pengebor, dll)

Dalam hal otomotif, magnesium merupakan material yang bagus untuk digunakan. Paduan magnesium bisa digunakan dalam bidang otomotif sebagai material untuk *interior*, *body*, *chasis* dan *power train*. Penggunaan magnesium pada mulanya digunakan pada kendaraan untuk olahraga (Formula-1). Magnesium digunakan agar dapat mengurangi massa dari mobil, sehingga mobil dapat berjalan dengan cepat. Berikut merupakan tabel aplikasi magnesium dalam hal *automobiles*.



Laporan Tugas Akhir Jurusan Teknik Material dan Metalurgi

System	Component	North America	Europe	Asia
Interior	Instrument panel	Yes	Yes	Yes
	Knee bolster retainer	Yes		
	Seat frame	Yes	Yes	Yes
	Seat riser	Yes	Yes	Yes
	Seat pan	Yes	Yes	
	Console bracket	Yes		
	Airbag housing	Yes		
	Center console cover		Yes	
	Steering wheel	Yes	Yes	Yes
	Keylock housing	Yes		
Body	Steering column parts	Yes	Yes	Yes
	Radio housing	Yes		
	Glove box door	Yes		
	Window motor housing	Yes	Yes	
	Door frame		Yes	
	Liftgate	Yes	Yes	
	Roof frame	Yes	Yes	
	Sunroof panel	Yes	Yes	
	Mirror bracket	Yes	Yes	
	Fuel filler lid		Yes	
Chassis	Door handle		Yes	Yes
	Spare tire carrier	Yes		
	Wheel (racing)	Yes	Yes	Yes
	ABS mounting bracket	Yes		
	Brake pedal bracket	Yes		Yes
Powertrain	Brake/accelerator bracket	Yes		
	Brake/clutch bracket	Yes		
	Brake pedal arm	Yes		
	Engine block		Yes	
	Valve cover/cam cover	Yes	Yes	Yes
	4WD transfer case	Yes		
	Transmission case		Yes	Yes
	Clutch housing and piston	Yes		
	Intake manifold	Yes	Yes	
	Engine oil pan		Yes	Yes
	Alternator/AC bracket	Yes		
	Transmission stator	Yes		
	Oil filter adapter	Yes		Yes
	Electric motor housing	Yes		

Gambar 2.7 Aplikasi magnesium secara global dalam hal *automobiles*

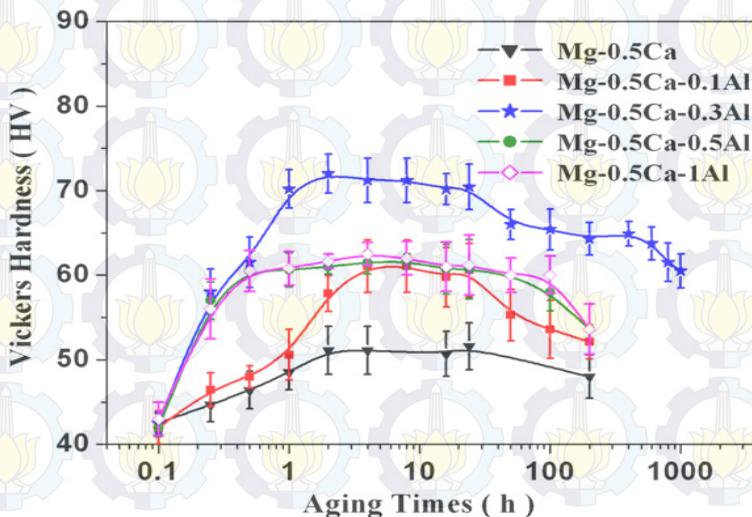
Dari gambar 2.7 dapat diketahui bahwa paduan magnesium memiliki berbagai aplikasi dalam hal otomotif. Misalkan dalam hal *power train*, magnesium dapat diaplikasikan



sebagai engine *block*, *valve*, *transmission case* dan lain-lain. Padahal pada umumnya aplikasi *power train* terbuat dari material paduan aluminium. Akan tetapi saat ini paduan magnesium telah digunakan oleh berbagai produsen untuk pengganti paduan aluminium.

2.10. Penelitian Sebelumnya

Jayaraj, dkk (2010) menuturkan bahwa presipitasi Hardening yang dilakukan pada paduan Mg-Ca dengan sedikit penambahan Al akan menaikkan nilai kekerasan dari 50 HV sampai sekitar 72 HV dalam paduan ternary Mg-0.5Ca-3Al. Gambar di bawah ini menunjukkan pengaruh lamanya waktu aging terhadap nilai kekerasan paduan Mg-0.5Ca-xAl ($x = 0.1, 0.3, 0.5, 1$ wt%) pada 200 °C. Kekerasan awal saat telah dilakukan quenching dari semua bagian paduan bernilai sama sekitar 40 HV. Puncak kekerasan dari paduan tercapai setelah waktu 2 jam terjadi pada paduan Mg-0.5Ca-0.3Al. Penambahan Al setelahnya (5 dan 1 wt%), tidak berpengaruh terhadap kenaikan kekerasan.



Gambar 2.8. Kurva hubungan antara *Aging Time* dan kekerasan.



Saat *aging time* yang lebih panjang akan menyebabkan penurunan nilai kekerasan seiring dengan pengkasaran dari struktur mikro. Nilai kekerasan setelah di-*aging* pun pada paduan Mg-0.5Ca-0.3Al akan tetap tinggi sekitar 60 HV sampai pada 1000 jam *aging*. Hal ini menunjukkan bahwa paduan ini akan memiliki ketahanan yang baik dari pengkasaran pada saat 200°C. Paduan *ternary* Mg-0.5Ca-0.3Al menunjukkan nilai yang sama dengan paduan *quinary* Mg-1Ca-1Zn-1Nd-0.6Zr yang telah diteliti sebelumnya. Hal ini juga mengindikasikan penambahan Al terhadap paduan Mg-Ca akan sangat menguntungkan mengingat harga Al yang lebih murah dibandingkan dengan Nd.

Pengujian SEM dari paduan Mg-0.5Ca-xAl ($x = 0.1, 0.3, 0.5, 1$ wt%) yang telah dilakukan *solution treatment* menunjukkan tidak ada *secondary phase* dari Al sampai dengan kandungan Al 0.3 wt% yang mana mengindikasikan adanya *super-saturated solid solution* dari Mg-(Ca-Al). Sebaliknya, dengan penambahan Al melebihi 0.3wt.% akan memunculkan fase Al₂Ca. Maka dari itu, penelitian ini menganjurkan kandungan Al untuk paduan Mg-0.5Ca maksimum sebesar 0.3%.



Laporan Tugas Akhir
Jurusan Teknik Material dan Metalurgi



BAB III METODOLOGI

3.1. Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Paduan Mg-5Al-3.5Ca
2. Larutan etsa Nital (1 – 5 ml HNO₃, 100 mL ethanol 95% atau methanol 95%)
3. Gas Argon

3.2. Alat Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

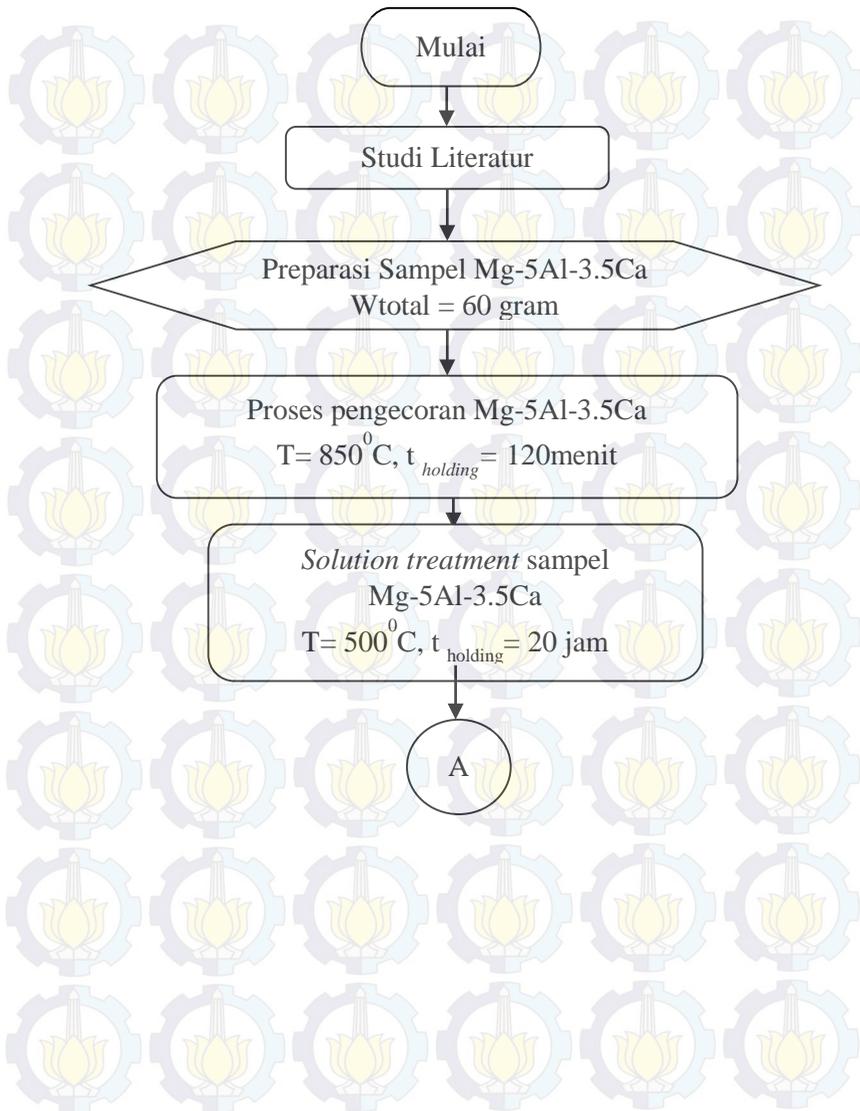
1. *Furnace* dengan Termokopel digunakan untuk melakukan *heat treatment* pada paduan Mg-5Al-3.5Ca
2. Mesin difraksi Sinar-X (XRD)
3. Mikroskop optik
4. Alat uji kekerasan

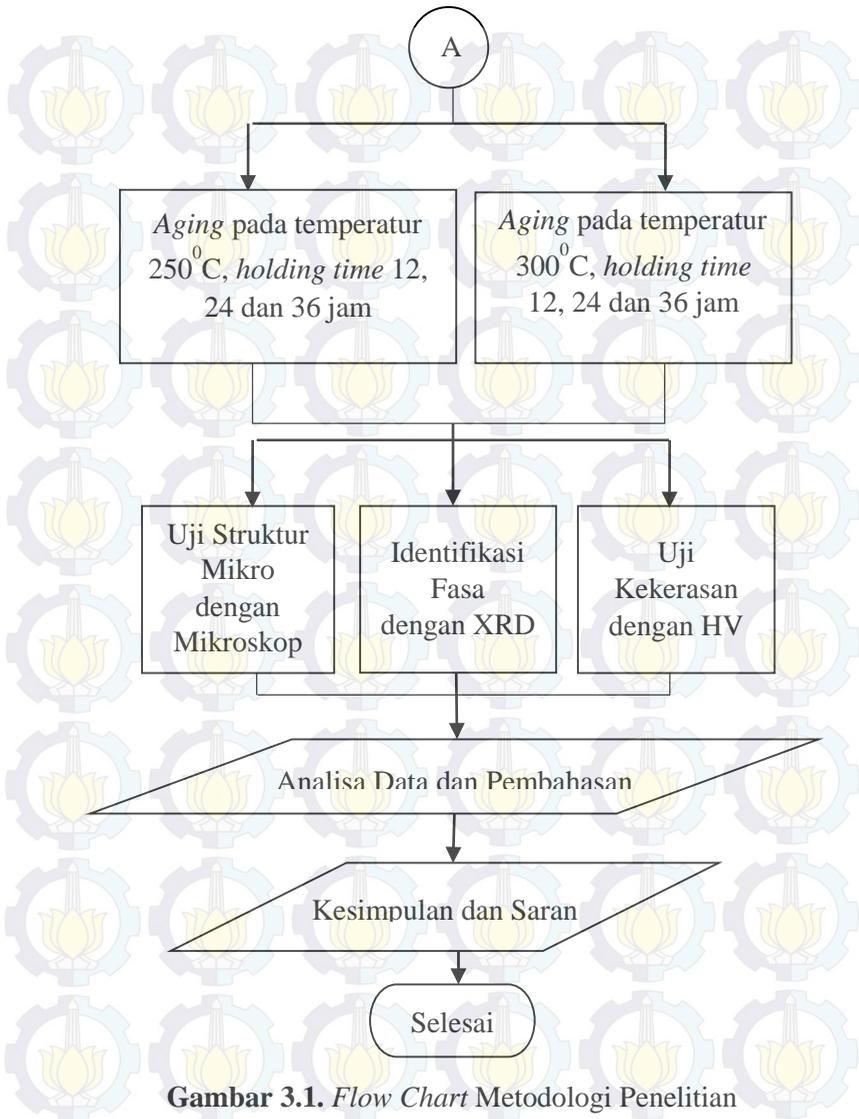
3.3. Variabel Penelitian

Variabel yang digunakan pada penelitian ini adalah pengaruh temperature *aging* dan waktu *holding aging* pada paduan Mg-5Al-3.5Ca. Temperatur yang digunakan adalah 250⁰C dan 300⁰C. Sedangkan waktu *holding* yang digunakan adalah 12 jam, 24 jam dan 36 jam.

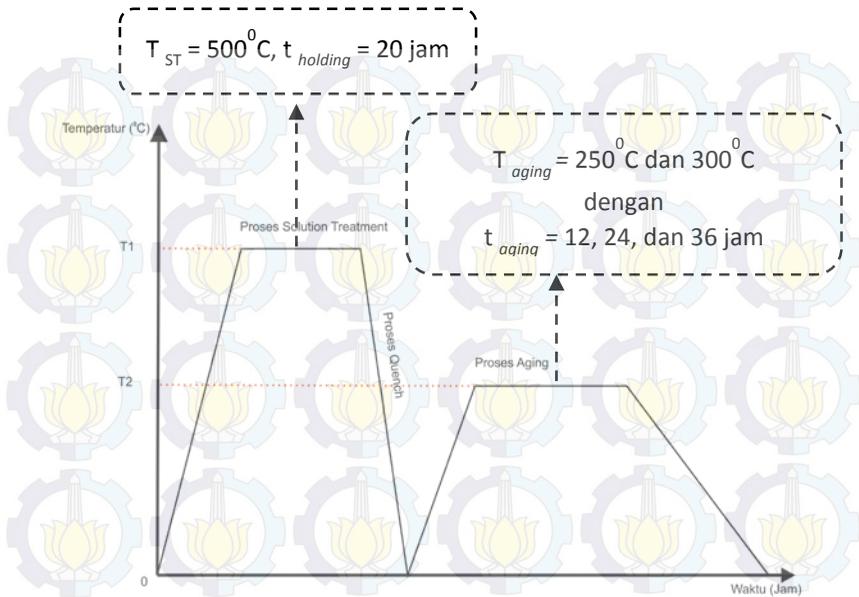
3.4. Diagram Alir Penelitian

Diagram alir yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.1.





Gambar 3.1. Flow Chart Metodologi Penelitian



Gambar 3.2 Profil Temperatur presipitasi *Hardening* paduan Mg-5Al-3.5Ca

3.5. Prosedur Penelitian

Prosedur yang dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan paduan Mg-5Al-3.5Ca.
2. Memasukan paduan Mg-5Al-3.5Ca ke dalam *furnace* dan memanaskan sampai temperatur 850°C dan tahan selama 2 jam.
3. Mendinginkan secara lambat di dalam *furnace* paduan yang masih cair hingga temperatur kamar.
4. Megeluarkan hasil coran padat dari dalam *furnace*
5. Mengeluarkan hasil coran dari cawan keramik
6. Memasukan paduan Mg-5Al-3.5Ca ke dalam *furnace* dan memanaskan sampai temperatur 500°C dan tahan selama 20 jam (proses *solution treatment*)



7. Menyelupkan Mg-5Al-3.5Ca ke dalam air dingin (proses *quenching*).
8. Memasukan Mg-5Al-3.5Ca kedalam *furnace* pada variasi temperatur 250°C selama 12, 24, dan 36 jam dan temperatur 300°C selama 12, 24, dan 36 jam.
9. Menguji semua spesimen dengan pengujian metalografi, pengujian kekerasan, dan identifikasi fasa

3.6. Proses Pengujian

3.6.1. Pengujian Struktur Mikro

Metalografi adalah suatu teknik atau metode persiapan material untuk mengukur, baik secara kuantitatif maupun kualitatif dari informasi-informasi yang terdapat dalam material yang dapat diamati, seperti fasa, butir, komposisi kimia, orientasi butir, jarak atom, dislokasi, topografi dan sebagainya. Adapun secara garis besar langkah-langkah yang dilakukan pada metalografi adalah:

1. Pemotongan spesimen (*sectioning*)
2. Pembikaian (*mounting*)
3. Penggerindaan (*grinding*) dengan kertas gosok dengan rentang *grade* 120-2000
4. Pemolesan (*polishing*) dengan menggunakan media kain beludru
5. Pengetsan (*etching*) selama 30 detik hingga satu menit lalu dibersihkan dengan air, lalu alkohol, dan akhirnya dikeringkan
6. Pengamatan pada mikroskop optik

Untuk melakukan pengetsan pada magnesium, maka larutan yang digunakan adalah Larutan etsa Nital (1-5 mL HNO₃ dan 100 mL ethanol atau methanol).

3.6.2. Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan merupakan pengujian standar skala industri, tetapi karena penekannya terbuat dari bola baja yang berukuran besar dan beban besar maka bahan yang sangat lunak atau sangat keras tidak dapat diukur kekerasannya. Di dalam



aplikasi manufaktur, material diuji untuk dua pertimbangan, sebagai riset karakteristik suatu material baru dan juga sebagai suatu analisa mutu untuk memastikan bahwa contoh material tersebut menghasilkan spesifikasi dan kualitas tertentu. Pengujian yang paling banyak dipakai adalah dengan menekan alat penekan tertentu kepada benda uji dengan beban tertentu dan dengan mengukur ukuran bekas penekanan yang terbentuk di atasnya, cara inilah yang dinamakan dengan penekanan. Kekerasan suatu material harus diketahui khususnya untuk material yang dalam penggunaannya akan mengalami pergesekan (*Frictional force*), dalam hal ini bidang keilmuan yang berperan penting mempelajarinya adalah Ilmu Bahan Teknik (*Engineering Materials*). Kekerasan didefinisikan sebagai kemampuan suatu material untuk menahan beban indentasi atau penetrasi (penekanan).

Didunia teknik, umumnya pengujian kekerasan menggunakan 4 macam metode pengujian kekerasan, yakni:

- *Brinell* (HB/BHN)
- *Rockwell* (HR/RHN)
- *Vickers* (HV/VHN)
- *Micro Hardness* (Namun jarang sekali dipakai-red)

Pemilihan masing-masing skala (metode pengujian) tergantung pada :

- Permukaan material
- Jenis dan dimensi material
- Jenis data yang diinginkan
- Ketersediaan alat uji

3.6.2.1. Metode Vickers

Pengujian kekerasan dengan metode *Vickers* bertujuan menentukan kekerasan suatu material dalam bentuk daya tahan material terhadap intan berbentuk piramida dengan sudut puncak 136 Derajat yang ditekankan pada permukaan material uji tersebut. Nilai ini dipilih karena mendekati sebagian besar nilai perbandingan yang diinginkan antar diameter lekukan dan diameter bola penumbuk pada uji kekerasan brinell (dieter, 1987).



Gambar 3.3 Skema pengujian kekerasan dengan metode Vickers

Angka kekerasan vickers (HV) didefinisikan sebagai beban dibagi luas permukaan lekukan. Pada prakteknya, Luas ini dihitung dari pengukuran mikroskopik panjang diagonal jejak. VHN dapat ditentukan dari persamaan berikut :

$$\text{VHN} = \frac{1,854 \times P}{d^2}$$

Keterangan:

VHN = *Vickers Hardness Number*

P = Beban yang diberikan (kgf)

d = Panjang diagonal rata-rata



3.6.3. Identifikasi Fasa

Proses identifikasi fasa menggunakan alat XRD. Difraksi sinar-X (XRD) merupakan suatu teknik yang digunakan untuk menentukan sistem kristal, kualitas kristal, simetri kristal, menentukan cacat kristal, mencari parameter, identifikasi campuran, dan analisis kimia. Berikut merupakan persamaan *Bragg* untuk XRD yang menjelaskan dimana beda jarak lintasan tepat $n\lambda$ dan selisih jarak antara 2 berkas sejajar adalah $2d \sin\theta$

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

Keterangan:

λ = panjang gelombang sinar-X (Å)

d = jarak antar kisi (Å)

θ = sudut difraksi (derajat)

n = 1,2,3, dst. (orde difraksi)

Sampel untuk analisis XRD dapat berupa bubuk, padatan, lapisan tipis, atau pita. Jumlah minimum sampel yang diperlukan hanya beberapa miligram namun dengan jumlah yang besar (gram) maka akan didapatkan keakuratan yang lebih baik. Hasil analisis dengan XRD adalah berupa difraktogram yang berupa susunan garis atau puncak dengan intensitas dan posisi berbeda-beda yang spesifik pada material yang dianalisis. Difraksi sinar X dapat digunakan untuk menentukan ukuran kristal (*crystallite size*) dengan fase tertentu.

3.7. Rancangan Penelitian

Berdasarkan diagram alir diatas maka dapat dibuat rancangan penelitian sebagai berikut:



Tabel 3.1 Rancangan Penelitian

Mg-5Al-3.5Ca			Pengujian			
Temperatur ($^{\circ}$ C)	Waktu <i> Holding</i> (jam)	Struktur Mikro	XRD	Kekerasan (<i>Hardness</i>)		
250	12	✓	✓	✓	✓	
	24	✓	✓	✓	✓	
	36	✓	✓	✓	✓	
300	12	✓	✓	✓	✓	
	24	✓	✓	✓	✓	
	36	✓	✓	✓	✓	



Laporan Tugas Akhir
Jurusan Teknik Material dan Metalurgi



BAB IV

ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1. Analisis Data

Pembuatan paduan Mg-5Al-3.5Ca dilakukan dengan proses peleburan (*melting process*). Bahan yang digunakan yaitu logam magnesium dalam bentuk padatan dan logam aluminium dan kalsium yang berupa serbuk. Pengecoran dilakukan di dalam *furnace* pada temperatur pemanasan 850°C dengan waktu tahan selama 2 jam.

Setelah pengecoran, pada paduan Mg-5Al-3.5Ca diberikan perlakuan panas *Precipitation Hardening* (T6). Tahap pertama dilakukan *solution treatment* dengan memasukkan spesimen ke dalam *furnace* pada temperatur 500°C dengan waktu tahan selama 8 jam dan 20 jam. Kemudian dilakukan pendinginan dengan cepat menggunakan media air dingin. Setelah itu dilakukan proses *aging* dengan variasi temperatur dan waktu.

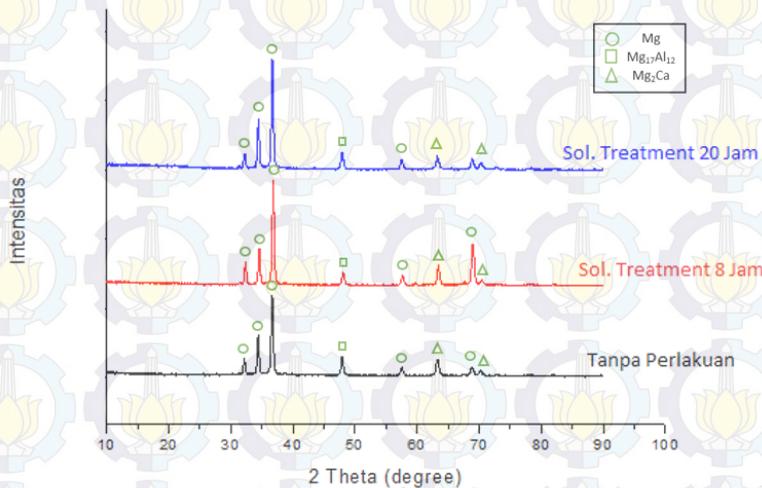
Pada tahap akhir, dilakukan karakterisasi material terhadap paduan untuk mendapatkan informasi berupa struktur mikro, fasa yang terbentuk, dan nilai kekerasan dari material Mg-5Al-3.5Ca. Pengujian yang dilakukan menggunakan metode metalografi, VHN, dan XRD.

4.1.1. Hasil Identifikasi Fasa

Proses Identifikasi Fasa menggunakan alat XRD dilakukan pada semua sampel yang ada. Identifikasi fasa dilakukan dengan sampel yang berbentuk padatan. Selanjutnya sampel dilakukan pengujian dengan menggunakan alat *PANAnalytical*. Pengujian pertama kali dilakukan dengan memakai sampel paduan Mg-5Al-3.5Ca. Pengujian pertama kali dilakukan untuk mengetahui apakah pada proses peleburan paduan Mg-5Al-3.5Ca telah menjadi sebuah paduan. Pengujian dilakukan dengan memakai range 2θ 10° - 90°. Identifikasi fasa hasil pengujian dilakukan dengan menggunakan software *High Score Plus* serta dengan pencocokan manual dengan kartu PDF dari Software JCPDF untuk



puncak – puncak yang teridentifikasi saat *search match*. Setelah proses pengecoran, dilakukan proses *solution treatment* pada paduan Mg-5Al-3.5Ca dengan waktu tahan selama 8 jam dan 20 jam. Grafik hasil identifikasi dibagi menjadi 3 bagian yaitu grafik paduan *as-cast* (tanpa perlakuan), grafik paduan setelah *solution treatment* 8 jam, dan grafik paduan setelah *solution treatment* 20 jam. Hal ini dilakukan untuk mempermudah dalam perbandingan.



Gambar 4.1 Grafik hasil pengujian XRD paduan Mg-5Al-3.5Ca pada sampel tanpa perlakuan, solution treatment 8 Jam, dan solution treatment 20 Jam

Pada paduan Mg-5Al-3.5Ca yang merupakan sampel awal pengujian identifikasi fasa menggunakan XRD, didapatkan hasil yang berupa beberapa senyawa. Dari hasil identifikasi didapatkan grafik yang menunjukkan letak *peak* yang sesuai dengan berbagai fasa yaitu Mg, Mg₁₇Al₁₂, dan Mg₂Ca. Dari gambar 4.1 dapat dilihat bahwa yang memiliki puncak tertinggi adalah fasa Mg. Dimana puncak tertingginya terdapat pada 2 Θ sebesar 36.6963. Fasa ini bersesuaian dengan (JCPDF#00-035-0821). Untuk fasa



Laporan Tugas Akhir Jurusan Teknik Material dan Metalurgi

Mg ini memiliki struktur kristal hexagonal dengan jumlah intensitas total dari kelima *peak* fase ini sebesar 214.84%. Sedangkan untuk fasa $Mg_{17}Al_{12}$ bersesuaian dengan (JCPDF# 01-076-2702) memiliki struktur kristal cubic dengan jumlah intensitas dari sebuah *peak* yang muncul sebesar 22.13%. Selanjutnya untuk fasa Mg_2Ca yang bersesuaian dengan (JCPDF# 00-053-0461) merupakan fasa yang memiliki bentuk kristal *monoclinic* dengan jumlah intensitas total dari kedua *peak* yang ada sebesar 24.89%.

Setelah proses pengecoran yang telah teridentifikasi fasenya berupa Mg, $Mg_{17}Al_{12}$, dan Mg_2Ca , dilakukan perlakuan *solution treatment* dengan waktu tahan selama 8 jam. Hasil identifikasi fasa pada gambar 4.1 menunjukkan letak puncak tertingginya fasa Mg terdapat pada 2θ sebesar 36.7815. Fasa ini bersesuaian dengan (JCPDF#00-035-0821). Fasa Mg ini memiliki struktur kristal hexagonal dengan jumlah intensitas total dari kelima *peak* dari fasa ini sebesar 204.78%. Pada proses ini juga terdapat fasa $Mg_{17}Al_{12}$ yang bersesuaian dengan (JCPDF# 01-076-2702) dengan struktur kristal kubik. Jumlah intensitas dari *peak* tunggal fasa ini adalah 11.68%. Sedangkan untuk fase Mg_2Ca yang bersesuaian dengan (JCPDF# 00-053-0461) merupakan fase yang memiliki bentuk kristal *monoclinic* dengan jumlah intensitas total dari kedua *peak* fasa ini adalah 24.22%. Dari gambar 4.4 juga dapat dilihat bahwa fase-fase sekunder masih terdeteksi, hal ini dikarenakan pada saat *solution treatment* dengan waktu tahan selama 8 jam fase tersebut belum terlarut semua kedalam Mg. Fase tersebut belum terlarut dikarenakan temperatur $500^{\circ}C$ pada saat *solution treatment* dan waktu tahan yang kurang lama. Oleh karena itu, selanjutnya dilakukan proses *solution treatment* yang kedua dengan temperatur yang sama dan penambahan waktu tahan selama 12 jam sehingga waktu tahan yang digunakan adalah 20 jam

Hasil identifikasi fasa sampel *solution treatment* dengan waktu tahan selama 20 jam pada gambar 4.1 menunjukkan posisi puncak tertingginya fasa Mg terdapat pada 2θ sebesar 36.6824. Merujuk pada (JCPDF#00-035-0821), Fasa Mg ini memiliki struktur kristal hexagonal. Hasil identifikasi juga menunjukkan



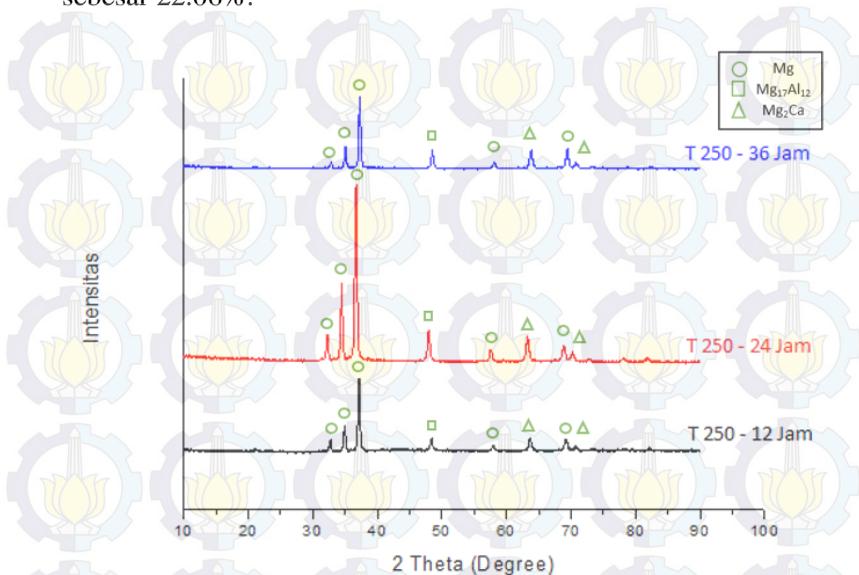
Laporan Tugas Akhir Jurusan Teknik Material dan Metalurgi

jumlah intensitas total dari kelima *peak* fase ini adalah 175.88%. Pada kondisi ini terdapat juga fasa $Mg_{17}Al_{12}$ yang bersesuaian dengan (JCPDF# 01-076-2702) dan memiliki struktur kristal kubik dengan jumlah intensitas dari *peak* tunggal fase ini sebesar 15.44%. Sedangkan untuk fase Mg_2Ca yang bersesuaian dengan (JCPDF# 00-053-0461) merupakan fase yang memiliki bentuk kristal *monoclinic* dengan intensitas total dari kedua *peak* yang muncul adalah 17.34%. Pada gambar 4.4 setelah sampel dilakukan proses *solution treatment* selama 20 jam juga masih menunjukkan adanya fase-fase sekunder, namun intensitasnya semakin berkurang. Hal ini dikarenakan temperatur dan waktu tahan yang masih kurang. Fase yang diinginkan adalah Mg primer agar dapat dilanjutkan ke proses selanjutnya yaitu proses *aging*. Adanya fase-fase sekunder saat kondisi ini juga disebabkan karena paduan ini terdiri dari 3 unsur yaitu Mg, Al, dan Ca. Jika merujuk pada diagram fase, kondisi ini memungkinkan terjadinya Al yang sudah terlarut dalam Mg pada temperatur 500°C. Setelah proses *solution treatment* maka dilanjutkan dengan proses *aging*.

Setelah dilakukan pengujian pada spesimen yang telah diberi perlakuan *aging*, Grafik hasil identifikasi fasa dibagi menjadi 3 bagian yaitu grafik yang menunjukkan hasil identifikasi fasa pada spesimen yang diberi perlakuan *aging* pada temperatur 250°C dan 300°C dengan variasi waktu tahan selama 12 jam, 24 jam, dan 36 jam. Pada *aging* 250°C dengan waktu tahan 12 jam (gambar 4.2), dapat dilihat bahwa yang memiliki puncak tertinggi adalah fasa Mg. Dimana puncak tertingginya terdapat pada 2θ sebesar 37.2178. Fasa ini bersesuaian dengan (JCPDF# 00-035-0821). Untuk fasa Mg memiliki struktur kristal hexagonal. Jumlah intensitas total dari kelima *peak* yang muncul untuk fasa ini adalah sebesar 172%. Pada proses *aging* ini masih terdapat fasa $Mg_{17}Al_{12}$. Untuk $Mg_{17}Al_{12}$ bersesuaian dengan (JCPDF# 01-076-2702) memiliki struktur kristal *cubic* dengan intensitas sebesar 15.33%. Sedangkan untuk fasa Mg_2Ca bersesuaian dengan (JCPDF# 00-053-0461) merupakan fase yang memiliki bentuk kristal



monoclinic dengan intensitas total dari kedua *peak* yang muncul sebesar 22.06%.



Gambar 4.2 Grafik hasil pengujian XRD paduan Mg-5Al-3.5Ca pada temperatur 250 °C dengan variasi waktu tahan 12 jam, 24 jam, dan 36 jam

Sedangkan pada *aging* 250°C dengan waktu tahan 24 jam dapat dilihat pada gambar 4.2 bahwa yang memiliki puncak tertinggi adalah fasa Mg. Dimana puncak tertingginya terdapat pada 2θ sebesar 36.7383. Fasa ini bersesuaian dengan (JCPDF# 00-035-0821). Untuk fasa Mg memiliki struktur kristal hexagonal dengan jumlah intensitas total dari kelima *peak* yang muncul sebesar 170.74%. Untuk fasa $Mg_{17}Al_{12}$ bersesuaian dengan (JCPDF# 01-076-2702) memiliki struktur kristal *cubic* dengan intensitas sebesar 17.08% dari *peak* tunggal pada grafik. Sedangkan untuk fasa Mg_2Ca bersesuaian dengan (JCPDF# 00-053-0461) merupakan fasa yang memiliki bentuk kristal *monoclinic*. Fasa ini memiliki intensitas total dari kedua *peak* yang muncul pada grafik sebesar 17.72%.



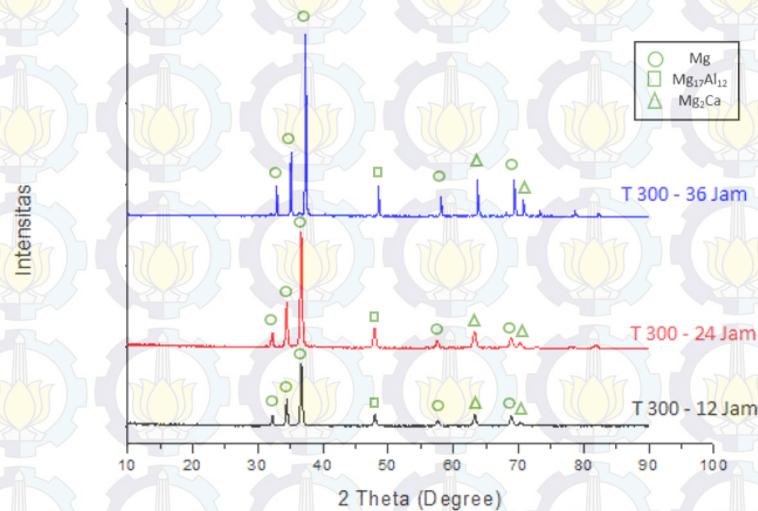
Sedangkan pada *aging* 250°C dengan waktu tahan 36 jam dapat dilihat dari gambar 4.2 bahwa yang memiliki puncak tertinggi adalah fasa Mg. Dimana puncak tertingginya terdapat pada 2θ sebesar 37.2703. Fasa ini bersesuaian dengan (JCPDF# 00-035-0821). Untuk fasa Mg memiliki struktur kristal hexagonal dengan intensitas total dari kelima *peak* sebesar 167.3%. Untuk $Mg_{17}Al_{12}$ yang bersesuaian dengan (JCPDF# 01-076-2702) memiliki struktur kristal *cubic* dan memiliki intensitas sebesar 23.94%. Sedangkan untuk fasa Mg_2Ca yang bersesuaian dengan (JCPDF# 00-053-0461) merupakan fase dengan bentuk kristal *monoclinic* dengan intensitas total dari kedua *peak* yang muncul sebesar 30.70%.

Untuk *aging* pada temperatur 300°C dengan waktu tahan selama 12 jam yang ditunjukkan oleh gambar 4.3 dapat dilihat bahwa yang memiliki puncak tertinggi adalah fasa Mg. Dimana puncak tertingginya terdapat pada 2θ sebesar 36.6748. Fasa ini bersesuaian dengan (JCPDF# 00-035-0821). Untuk fasa Mg memiliki struktur kristal hexagonal dengan total intensitas dari kelima *peak* pada grafik sebesar 180.58%. Untuk fasa $Mg_{17}Al_{12}$ yang masih muncul bersesuaian dengan (JCPDF# 01-076-2702) memiliki struktur kristal *cubic* dengan intensitas sebesar 17.11%. Sedangkan untuk fasa Mg_2Ca bersesuaian dengan (JCPDF# 00-053-0461). Fasa ini merupakan fase yang memiliki bentuk kristal *monoclinic* dengan intensitas total dari kedua *peak* pada grafik sebesar 22.33%.

Untuk *aging* pada temperatur 300°C dengan waktu tahan 24 jam yang dapat dilihat dari gambar 4.3 bahwa yang memiliki puncak tertinggi adalah fasa Mg. Dimana puncak tertingginya memiliki 2θ sebesar 36.6644. Fasa ini bersesuaian dengan (JCPDF# 00-035-0821). Untuk fasa Mg memiliki struktur kristal hexagonal dengan jumlah intensitas total dari kelima *peak* yang muncul pada grafik sebesar 165.33%. Untuk fase $Mg_{17}Al_{12}$ yang bersesuaian dengan (JCPDF# 01-076-2702) memiliki struktur kristal *cubic* dengan intensitas sebesar 16.89%. Sedangkan untuk fasa Mg_2Ca yang bersesuaian dengan (JCPDF# 00-053-0461)



merupakan fase yang memiliki bentuk kristal *monoclinic* dengan intensitas total dari kedua *peak* yang muncul pada grafik sebesar 16.78%.



Gambar 4.3 Grafik hasil pengujian XRD paduan Mg-5Al-3.5Ca pada temperatur 300 °C dengan variasi waktu tahan 12 jam, 24 jam, dan 36 jam

Sedangkan untuk *aging* pada temperatur 300°C dengan waktu tahan 36 jam dapat dilihat pada gambar 4.3 bahwa yang memiliki puncak tertinggi adalah fasa Mg. Dimana puncak tertingginya memiliki 2θ sebesar 37.3394. Fasa ini bersesuaian dengan (JCPDF# 00-035-0821) dan memiliki struktur kristal hexagonal. Fasa ini memiliki jumlah intensitas total dari kelima *peak* yang muncul pada grafik sebesar 182.45%. Fase $Mg_{17}Al_{12}$ yang bersesuaian dengan (JCPDF# 01-076-2702) memiliki struktur kristal *cubic* dengan intensitas sebesar 15.27%. Sedangkan untuk fasa Mg_2Ca yang bersesuaian dengan (JCPDF# 00-053-



0461) merupakan fase yang memiliki bentuk kristal *monoclinic* dengan intensitas total dari kedua *peak* sebesar 24.69%.

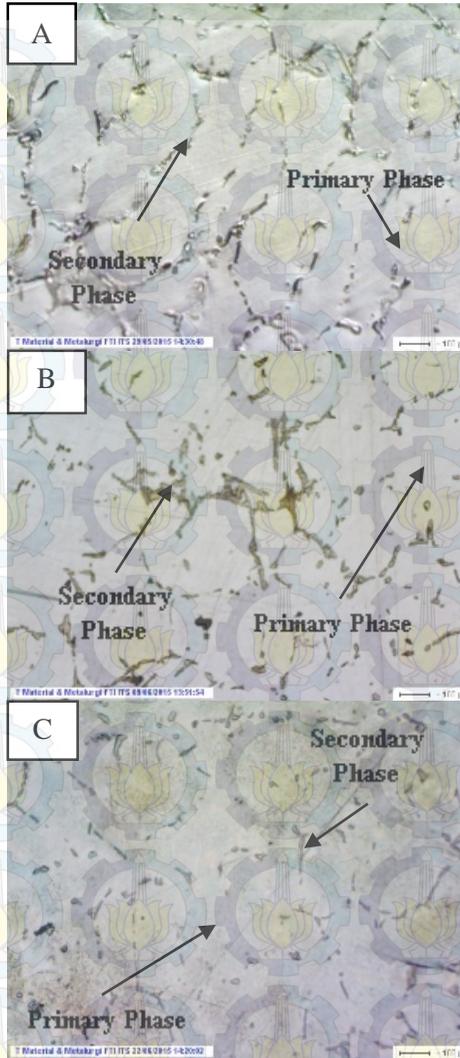
4.1.2. Hasil Pengujian Struktur Mikro

Pengujian metalografi merupakan pengujian yang dilakukan untuk mengetahui struktur mikro suatu sampel. Pada paduan Mg-5Al-3.5Ca ini dilakukan pengujian metalografi dengan menggunakan Larutan etsa Nital (1-5 mL HNO₃ dan 100 mL ethanol atau methanol) dan dilakukan dengan perbesaran 50x, 100x, dan 500x.

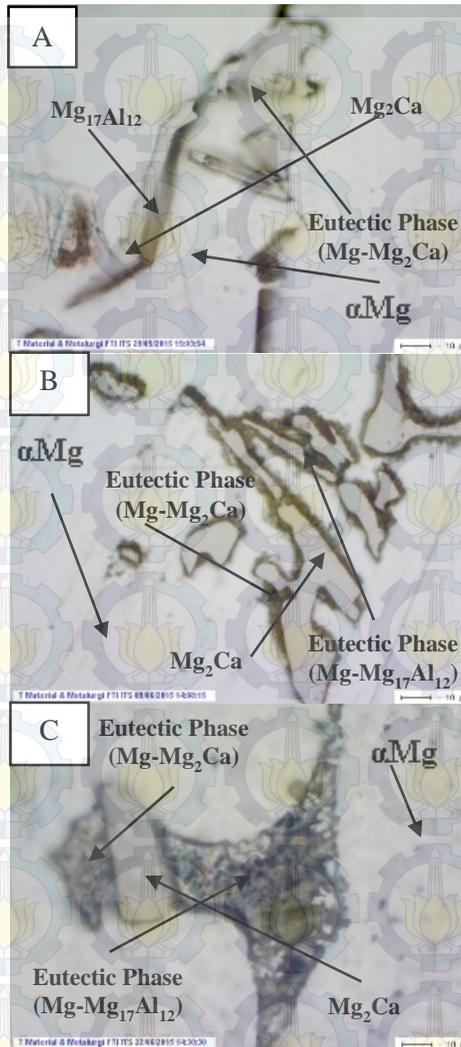
Untuk data mikrostruktur acuan, metalografi dilakukan pada paduan Mg-5Al-3.5Ca tanpa perlakuan. Struktur mikro dari Mg-5Al-3.5Ca dapat dilihat pada gambar 4.4. Pada struktur mikro paduan *as-cast* (tanpa perlakuan) ini fase yang terbentuk adalah fase primer α Mg dan fase sekunder yang berupa *eutectic phase* (gambar 4.5). Selanjutnya material uji diberikan perlakuan *solution treatment* pada temperatur 500°C dengan waktu tahan selama 8 jam. Gambar struktur mikro paduan yang sudah mengalami *solution treatment* selama delapan jam dapat dilihat pada gambar 4.1. Dalam kondisi ini struktur mikro terdiri dari fase primer α Mg dan fase sekunder yang berupa *eutectic phase* (gambar 4.5).

Setelah spesimen dilakukan proses *solution treatment* selama 8 jam, spesimen belum menunjukkan kondisi fasa yang diinginkan sehingga dilakukan penambahan waktu *holding* selama 12 jam, jadi proses *solution treatment* dilakukan sekali lagi pada temperatur 500°C dengan waktu tahan selama 20 jam. Gambar struktur mikro paduan ini dapat dilihat pada gambar 4.4. Pengambilan foto mikro menunjukkan adanya fase primer α Mg dan fase sekunder yang berupa *eutectic phase* (gambar 4.5).

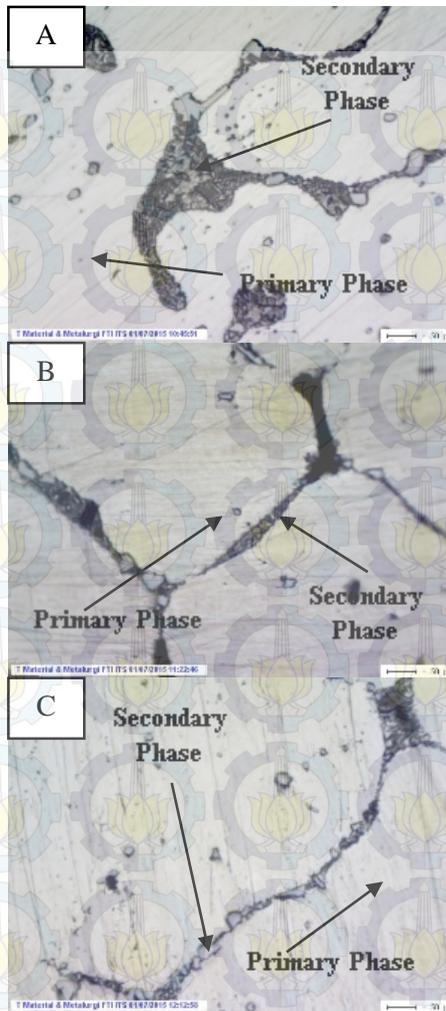
Setelah spesimen diberikan proses perlakuan *solution treatment*, dilakukan proses pengerasan presipitasi dengan melakukan *aging* pada temperatur 250 °C dan 300 °C, dengan variasi waktu tahan selama 12 jam, 24 jam, dan 36 jam pada setiap temperatur.



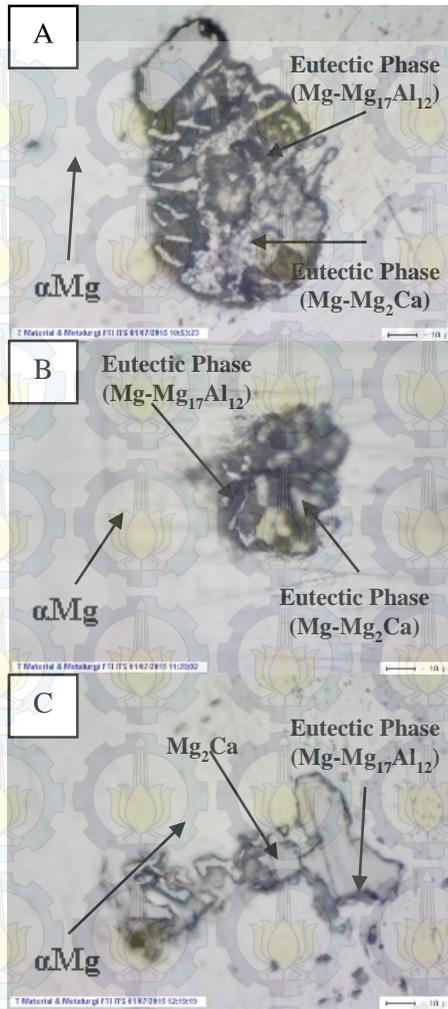
Gambar 4.4 Struktur mikro paduan Mg-5Al-3.5Ca (a) tanpa perlakuan; (b) *solution treatment* 8 jam; dan (c) *solution treatment* 20 jam dengan perbesaran 50x



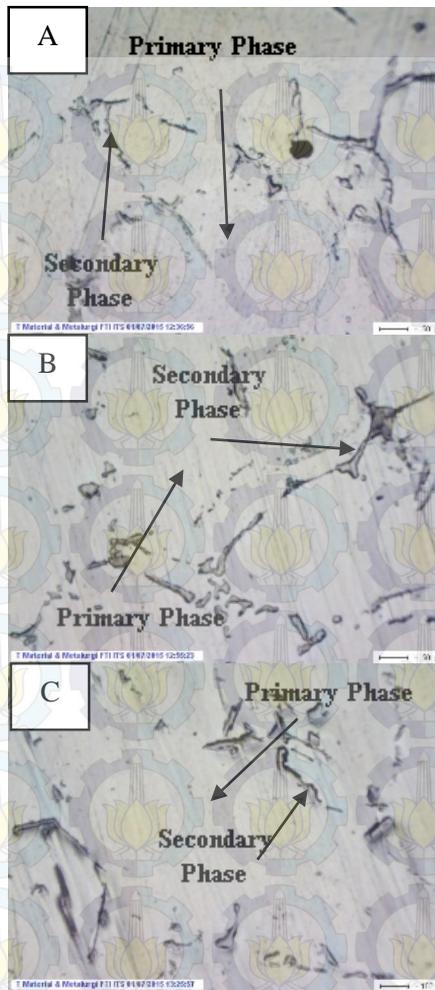
Gambar 4.5 Struktur mikro paduan Mg-5Al-3.5Ca (a) tanpa perlakuan; (b) *solution treatment* 8 jam; dan (c) *solution treatment* 20 jam dengan perbesaran 500x



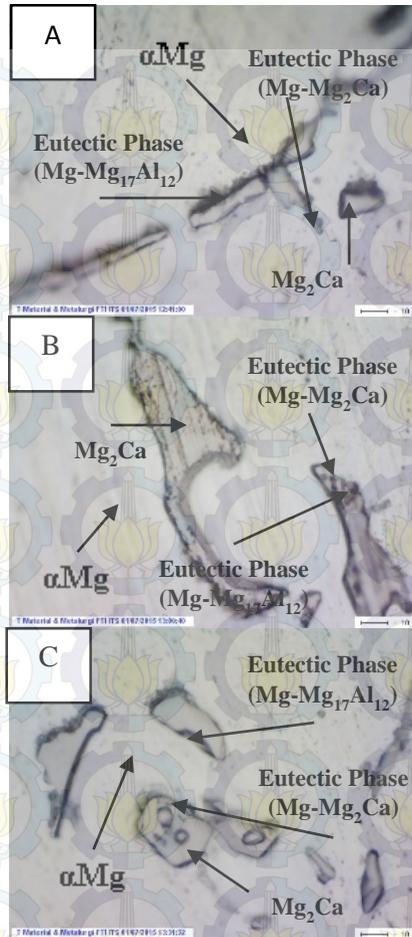
Gambar 4.6 Struktur mikro paduan Mg-5Al-3.5Ca setelah diberi perlakuan *aging* pada temperatur 250 °C dengan waktu tahan (a) 12 jam; (b) 24 jam; dan (c) 36 jam dengan perbesaran 100x



Gambar 4.7 Struktur mikro paduan Mg-5Al-3.5Ca setelah diberi perlakuan *aging* pada temperatur 250 °C dengan waktu tahan 12 jam, 24 jam, dan 36 jam dengan perbesaran 500x



Gambar 4.8 Struktur mikro dengan perbesaran 100x paduan Mg-5Al-3.5Ca aging pada temperatur 300 °C dengan waktu tahan (a) 12 jam; (b) 24 jam; dan (c) 36 jam.



Gambar 4.9 Struktur mikro paduan Mg-5Al-3.5Ca aging pada temperatur 300 °C dengan waktu tahan 12 jam, 24 jam, dan 36 jam dengan perbesaran 500x

Setelah dilakukan proses *aging* pada temperatur 250°C dengan waktu tahan selama 12 jam, 24 jam, dan 36 jam (gambar 4.6), Struktur mikro masih terdiri dari dua fase yaitu fase primer



α Mg dan fase sekunder yang berupa *eutectic phase* (gambar 4.7). Pada struktur mikro dari paduan yang telah mengalami proses *aging* pada temperatur 300°C dengan waktu tahan selama 12 jam, 24 jam, dan 36 (gambar 4.8) jam juga menunjukkan adanya fase primer α Mg dan fase sekunder yang berupa *eutectic phase* (gambar 4.9).

4.1.3. Hasil Pengujian Kekerasan

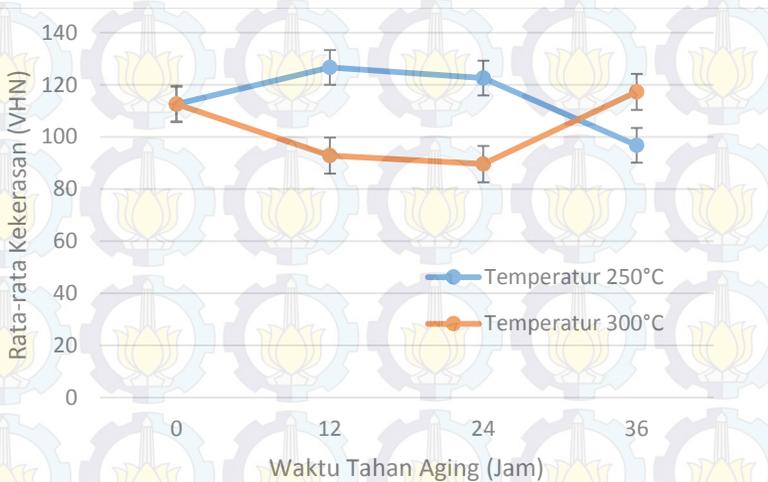
Pada pengujian kekerasan menggunakan pengujian kekerasan brinell. Dalam pengujian kekerasan ini menggunakan standar ASTM E92. Dimana pengujian ini menggunakan indentor berbahan dasar intan berbentuk piramid dengan ukuran diameter 2.5mm dan diberikan beban sebesar 150 Kgf serta waktu indentasi 10 detik.

Tabel 4.1 Hasil uji kekerasan sampel aging 250°C dan 300°C dengan waktu tahan 12, 24 dan 36 jam.

Perlakuan	Kekerasan (VHN)			Rata-rata kekerasan (VHN)
	1	2	3	
Tanpa Perlakuan	77.4	74.9	74.3	75.533
Solution Treatment (8 Jam)	78	78.7	89.1	81.933
Solution Treatment (20 Jam)	116	104	118	112.667
Aging				
Temperatur (°C)	Holding Time (Jam)			
250	12	135	120	125
	24	140	105	123
	36	97.3	93.8	99.4
300	12	86.9	104	87.8
	24	88.2	86.7	94



Pengujian dilakukan menggunakan Universal Hardness Tester HBRV-187.5A S/N 06000060 dengan metode Vickers. Pengujian dilakukan pada sampel paduan Mg-5Al-3.5Ca yang tanpa diberikan perlakuan, sampel yang telah diberikan perlakuan *solution treatment* dan sampel yang diberikan perlakuan *aging* pada temperatur 250°C dan 300°C dengan waktu tahan 12, 24 dan 36 jam.



Gambar 4.10 Grafik nilai kekerasan material Mg-5Al-3.5Ca hasil proses aging

Dari gambar 4.10 dapat dilihat bahwa paduan Mg-5Al-3.5Ca hasil proses pengecoran (*as-cast*) memiliki kekerasan sebesar 75.533 VHN. Setelah diberikan perlakuan *solution treatment* dengan waktu tahan selama 8 jam kekerasan sampel mengalami penurunan kekerasan menjadi rata-rata sebesar 81.933 VHN. Kemudian setelah dilakukan proses *solution treatment* yang kedua dengan waktu tahan 20 jam, nilai kekerasan paduan mengalami kenaikan menjadi 112.667 VHN.



Dengan dilakukannya perlakuan *aging* pada temperatur 250°C dengan waktu tahan selama 12 jam didapatkan nilai kekerasan paduan sebesar 126.667 VHN. Sedangkan *aging* yang dilakukan pada temperatur 250°C dengan waktu tahan 24 jam didapatkan nilai kekerasan sebesar 122.667 VHN dan untuk sampel *aging* pada temperatur 250°C dengan waktu tahan 36 jam memiliki nilai kekerasan sebesar 96.833 VHN.

Setelah dilakukan proses *aging* pada temperatur 300°C didapatkan nilai kekerasan yang cenderung lebih rendah dibandingkan dengan nilai kekerasan paduan dengan *aging* pada temperatur 250°C. Untuk paduan dengan perlakuan *aging* pada temperatur 300°C dengan waktu tahan 12 jam didapatkan nilai kekerasan sebesar 92.9 VHN. Nilai kekerasan paduan dengan perlakuan *aging* pada temperatur 300°C dengan waktu tahan 24 jam adalah sebesar 89.633 VHN, namun untuk paduan dengan *aging* pada temperatur 300°C dengan waktu tahan 36 jam nilai kekerasan paduan mengalami kenaikan dibandingkan dengan sampel *aging* temperatur 300°C sebelumnya. Nilai kekerasannya sebesar 117.33 VHN.

4.2. Pembahasan

Pengujian struktur mikro pada paduan Mg-5Al-3.5Ca menunjukkan fase yang dominan adalah fase α Mg. Selain α Mg, juga terdapat *secondary phase* yang merupakan fase eutektik dari (Mg- $Mg_{17}Al_{12}$) dan (Mg- Mg_2Ca) yang berbentuk lamelar, sebagaimana ditunjukkan pada gambar 4.4 dan 4.5. Fase eutektik ini terbentuk karena titik beku suatu zat murni akan menurun bila ditambahkan zat lain, asalkan zat lain itu dapat larut dalam keadaan cair tetapi tidak larut dalam keadaan padat (tidak larut-padat). Hal ini juga terjadi pada paduan Mg-5Al-3.5Ca.

Dalam keadaan murni, logam Mg, Al, atau Ca akan membeku pada satu temperatur tertentu. Bila Al atau Ca ditambahkan pada logam Mg, titik awal pembekuan akan menurun, demikian pula bila Mg ditambahkan pada logam Al atau Ca maka titik pembekuan juga akan menurun. Karena masing-masing saling



Laporan Tugas Akhir Jurusan Teknik Material dan Metalurgi

menyebabkan penurunan titik awal pembekuan maka akan ada suatu paduan eutektik yang menunjukkan temperatur awal pembekuan paling rendah. Semua paduan yang mempunyai komposisi seperti paduan eutektik akan membeku pada temperatur eutektik (lihat diagram fasa Mg-Al dan Mg-Ca).

Munculnya fase eutektik dari Mg-Mg₁₇Al₁₂ dan Mg-Mg₂Ca menandakan terjadi penguapan logam Mg selama proses perlakuan panas. Berkurangnya Mg menyebabkan menambahnya komposisi fase sekunder Al dan Ca sehingga menyebabkan posisi paduan di diagram fasa bergeser. Hal ini membuat fase eutektik muncul dari fase liquid yang berlebih saat proses pendinginan karena melewati temperatur eutektik.

Paduan Mg-5Al-3.5Ca akan mengalami perubahan sama seperti perubahan selama pembekuan sistem paduan larutan padat, ketika temperatur memotong garis liquidus, mulai terjadi pembekuan menjadi larutan padat α yang sangat kaya Mg, dan pembekuan terus berlanjut dengan pembekuan kristal yang makin kaya Al ataupun Ca (mengikuti garis solidus) dan larutan cair yang juga makin kaya Al dan Ca (mengikuti garis liquidus). Pada temperatur batas solidus pembekuan selesai dan selanjutnya kristal larutan padat α bertumbuh dan terus berdifusi hingga kristal menjadi homogen.

Berdasarkan diagram fasa Mg-Al dan Mg-Ca, pada temperatur di atas garis *solvus* α adalah larutan padat yang tidak jenuh sebenarnya masih mampu melarutkan lebih banyak Al atau Ca. Di daerah α , kelarutan Al atau Ca dalam α maksimum, dengan penurunan temperatur kelarutan juga akan menurun (mengikuti garis *solvus*). Tepat di garis *solvus*, α mencapai batas kelarutannya, α menjadi jenuh akan Al dan Ca. Di bawah temperatur ini kandungan Al dan Ca pada paduan ini sudah melewati batas kelarutan Al pada Mg dan Ca pada Mg, sehingga harus ada Al dan Ca yang keluar dari α . Al atau Ca yang berpresipitasi ini tidak keluar sebagai logam Al atau logam Ca melainkan akan berupa fase sekunder β yang biasanya berpresipitasi di sepanjang batas butir kristal α .



Setelah dilakukan *solution treatment* paduan Mg-5Al-3.5Ca dengan waktu tahan selama 8 jam, struktur mikro menunjukkan intensitas fase α Mg dan fase sekunder yang terbentuk semakin berkurang. Perhitungan hasil pengujian XRD (dapat dilihat di bagian lampiran) menunjukkan penurunan intensitas fase α Mg dari kelima *peak* yang muncul menjadi 204.78%, begitu pun dengan fase sekunder. Dari struktur mikro (gambar 4.4 dan gambar 4.5) dapat dilihat bahwa pada batas butir masih terlihat fase sekunder yang berupa fase eutektik yang belum terlarut dikarenakan waktu tahan yang belum mencukupi untuk proses difusi.

Pada *solution treatment* dengan waktu tahan selama 20 jam, intensitas dari fase α Mg yang terbentuk juga semakin berkurang, sedangkan intensitas dari fasa sekunder mengalami kenaikan dibandingkan intensitas pada fase dengan waktu tahan 8 jam. Hal ini dibuktikan dengan ukuran fase sekunder yang semakin kecil dengan jumlah yang lebih banyak sebagaimana ditunjukkan oleh gambar 4.4 dan 4.5, tetapi pada batas butir juga masih terlihat fase eutektik yang tidak terlarut dikarenakan temperatur yang digunakan saat *solution treatment* yaitu 500°C. Sedangkan fase Mg₂Ca (*eutectic phase*) sendiri mempunyai kelarutan pada temperatur 516,5°C. Terjadinya hal ini juga dapat disebabkan oleh kurangnya waktu tahan pada saat *solution treatment*.

Pada pengujian kekerasan dapat dilihat bahwa penambahan waktu tahan selama 20 jam saat dilakukan proses *solution treatment* menyebabkan kenaikan kekerasan hingga 112.667 VHN. Hal ini disebabkan karena intensitas fase sekunder semakin berkurang seiring bertambahnya waktu penahanan sehingga kekerasan menjadi naik. Kekerasan yang tinggi juga disebabkan karena perlakuan pendinginan secara cepat (*quenching*) dalam media air dingin.

Setelah sampel diberi perlakuan *solution treatment* selama 20 jam kemudian dilakukan pemanasan untuk melakukan proses aging. Pada gambar 4.6 dan gambar 4.7 merupakan gambar struktur mikro dari sampel yang dipanaskan pada temperatur 250°C



dengan waktu tahan selama 12 jam, 24 jam, dan 36 jam. Pada gambar struktur mikro tersebut terlihat beberapa partikel kecil yang mengendap. Menurut penelitian Jayaraj,dkk pada tahun 2010 partikel tersebut setelah diidentifikasi menggunakan TEM (*Transmission Electron Microscope*) merupakan presipitat Mg_2Ca yang terbentuk setelah dilakukannya proses aging. Karena ukurannya yang sangat kecil, saat diidentifikasi menggunakan mikroskop optik hanya terlihat sebuah titik kecil saja. Pada saat waktu tahan 24 jam terjadi penurunan jumlah titik-titik kecil dan ukuran fase sekundernya semakin mengecil. Selanjutnya terjadi penambahan partikel-partikel kecil pada saat waktu tahan 36 jam.

Perubahan yang ditunjukkan oleh struktur mikro berhubungan dengan hasil identifikasi fasa dan pengujian mekanik. Hasil perhitungan pengujian XRD menunjukkan bahwa terjadi perubahan intensitas dari fase-fase sekunder saat penambahan waktu tahan pada proses *aging* dari 12 jam ke 24 jam. Penurunan intensitas yang terjadi pada fase Mg_2Ca dari 22.06% menjadi 17.72% serta naiknya intensitas $Mg_{17}Al_{12}$ dari 15.33% menjadi 17.08% menyebabkan turunnya nilai kekerasan menjadi 122.667 VHN. Setelah dilakukan *aging* dengan waktu tahan 36 jam, intensitas fase Mg_2Ca mengalami kenaikan, namun juga diikuti dengan kenaikan intensitas fase $Mg_{17}Al_{12}$. Pada saat ini, nilai intensitas $Mg_{17}Al_{12}$ sangat tinggi yaitu sebesar 23.94%, tertinggi diantara proses lainnya. Hal ini menyebabkan nilai kekerasan mengalami penurunan hingga mencapai 96.833 VHN.

Pada gambar 4.8 dan gambar 4.9 yang merupakan gambar struktur mikro dari Mg-5Al-3.5Ca dengan temperatur aging 300°C. Dengan waktu tahan yang digunakan adalah 12 jam, 24 jam, dan 36 jam. Pada gambar struktur mikro dengan waktu tahan aging 12 jam tersebut terlihat beberapa partikel kecil yang mengendap. Pada saat waktu tahan 24 jam terjadi penurunan jumlah titik-titik kecil dan ukuran fase sekundernya semakin mengecil. Perhitungan hasil pengujian XRD juga menunjukkan penurunan intensitas dari fase Mg_2Ca menjadi 16.78%. Hal ini menyebabkan turunnya nilai kekerasan hingga mencapai titik terendah sebesar 89.633 VHN bila



dibandingkan dengan nilai kekerasan pada proses lainnya. Selanjutnya terjadi penambahan partikel-partikel kecil dan fase sekunder pada saat waktu tahan 36 jam dengan persebaran yang lebih merata. Hal ini dibuktikan dengan bertambahnya intensitas dari fase Mg_2Ca sebesar 7.91% menjadi 24.69% sehingga menyebabkan kenaikan nilai kekerasan hingga mencapai 117.333 VHN.

Pada tabel 4.1 didapatkan bahwa rata-rata nilai kekerasan paling tinggi terdapat pada saat paduan diberi perlakuan *aging* di temperatur $250^{\circ}C$ dengan waktu tahan selama 12 jam. Hal ini disebabkan karena intensitas fase Mg_2Ca saat kondisi ini memiliki jumlah terbanyak dan jumlah intensitas fase $Mg_{17}Al_{12}$ yang rendah sehingga nilai kekerasannya pun tinggi. Sedangkan nilai rata-rata kekerasan yang paling rendah terdapat pada saat paduan diberikan perlakuan *aging* di temperatur $300^{\circ}C$ dengan waktu tahan selama 24 jam. Hal ini terjadi dikarenakan fase Mg_2Ca memiliki intensitas yang paling rendah serta naiknya intensitas fase $Mg_{17}Al_{12}$ dibandingkan pada waktu tahan 12 jam dan 36 jam.

Nilai rata-rata kekerasan yang dimiliki paduan saat perlakuan *aging* pada temperatur $250^{\circ}C$ lebih tinggi dibandingkan dengan Nilai rata-rata kekerasan yang dimiliki paduan saat perlakuan *aging* pada temperatur $300^{\circ}C$. Hal ini membuktikan bahwa dengan penuaan (*aging*) pada temperatur rendah kekerasan maksimumnya akan lebih rendah dan waktu untuk mencapai kekerasan maksimum juga akan lebih panjang, tetapi tidak mengalami *overaged*. Penuaan pada temperatur yang lebih tinggi dapat mencapai kekerasan yang lebih tinggi dalam waktu yang relatif lebih singkat, tetapi ada kemungkinan akan mengalami *overaged*. Bahkan pada temperatur yang lebih tinggi, *overaging* dapat terjadi dalam waktu yang sangat singkat.



Laporan Tugas Akhir
Jurusan Teknik Material dan Metalurgi



BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari pengujian yang telah dilakukan pada penelitian ini dapat ditarik kesimpulan bahwa :

1. Fasa yang terbentuk pada paduan Mg-5Al-3.5Ca yaitu Mg, Mg₁₇Al₁₂, Mg₂Ca, dan fase eutektik dari Mg-Mg₁₇Al₁₂ dan Mg-Mg₂Ca.
2. Peningkatan kuantitas pembentukan fase Mg₂Ca menyebabkan naiknya nilai kekerasan hingga mencapai 126.667 VHN, namun peningkatan kuantitas fase Mg₁₇Al₁₂ berpengaruh pada turunnya nilai kekerasan hingga mencapai titik terendah yaitu 89.663 VHN.
3. Semakin tinggi temperatur *aging* membutuhkan waktu tahanan yang lebih singkat untuk mencapai kekerasan yang lebih tinggi.

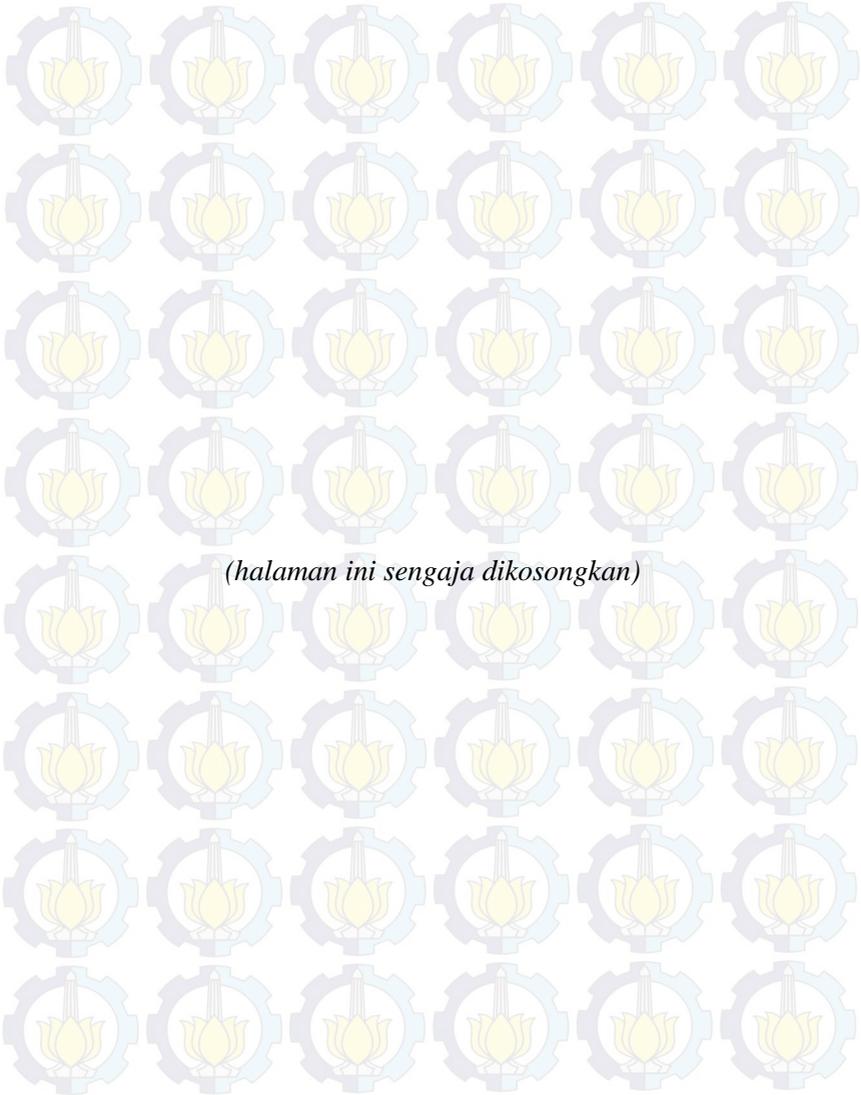
5.2 Saran

Untuk penelitian selanjutnya mengenai proses presipitasi hardening pada Mg-5Al-3.5Ca disarankan :

1. Melakukan pengadukan pada saat proses pengecoran agar sampel uji homogen.
2. Menggunakan diagram fasa *ternary* agar dapat menentukan temperatur yang tepat pada proses *solution treatment* agar seluruh fasa dapat terlarut dalam Mg.



Laporan Tugas Akhir
Jurusan Teknik Material dan Metalurgi

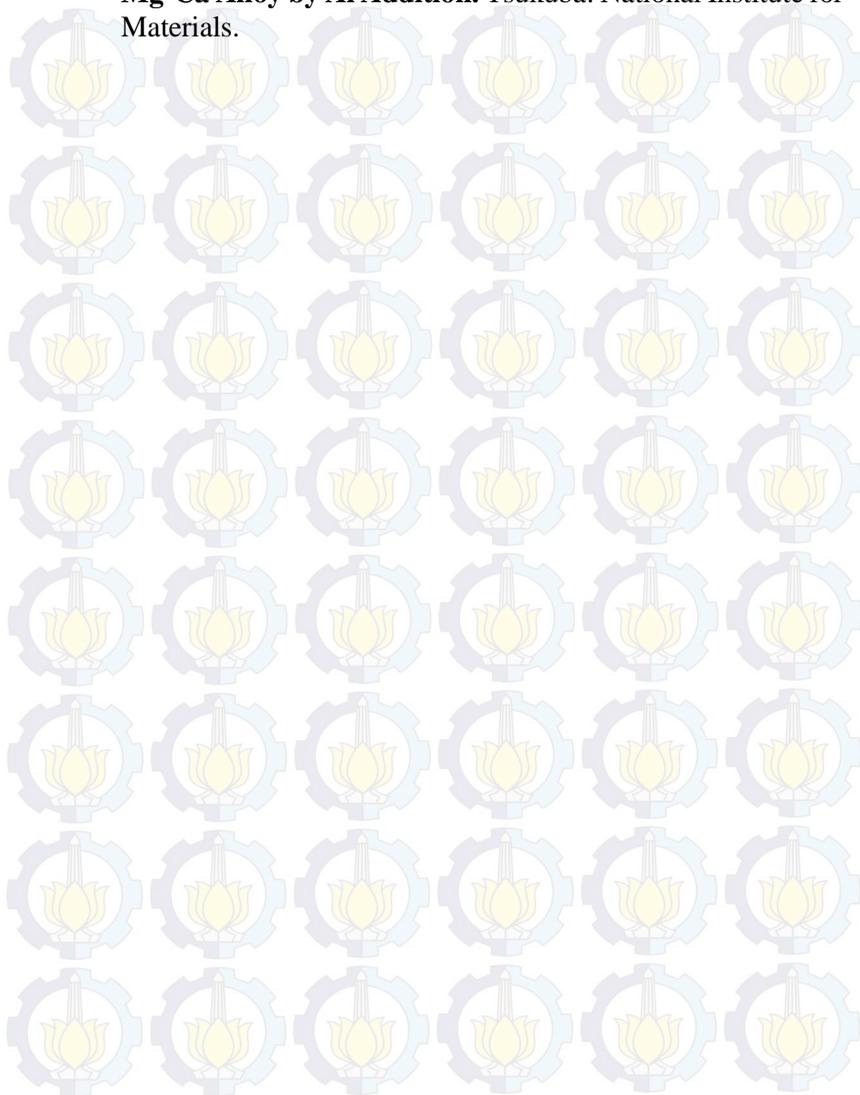


DAFTAR PUSTAKA

1. Abu Leil, T. 2009. **Development of New Magnesium Alloys for High Temperature Applications**. Bethlehem: Clausthal University of Technology.
2. Okamoto, H. 1998. In A. A. Nayeb-Hashemi and J. B. Clark (eds). **Phase Diagrams of Binary Magnesium Alloys**. Metals Park, OH: ASM International.
3. Changjiang, Song. 2009. **Review of Grain Refinement Methods for As-Cast Microstructure of Magnesium Alloy**. Shanghai: Shanghai University.
4. Wei, Shanghai., dkk. 2008. **Compressive creep behavior of as-cast and aging-treated Mg-5wt% Sn alloys**. Auckland: Elsevier B.V.
5. Liu, Hongmei. 2006. **The microstructure, tensile properties, and creep behavior of as-cast Mg-(1-10)%Sn alloys**. Chengdu: Elsevier B.V.
6. Neite, G. 2005. In R.W. Cahn, P. Haasen, and E. J. Kramer (eds) **Materials Science and Technology, Vol. 8**. Germany: Wiley-VCH.
7. Garcia, Enrique Meza. 2010. **Influence of alloying Elements on the Microstructure and Mechanical Properties of Extrude Mg-Zn Based Alloy**. Berlin: Technischen Universität Berlin
8. Byron, B. 1997. **Global Overview of Automotive Magnesium Requirements and Supply & Demand**. Aalen: Automotive Seminar der International Magnesium Association (IMA).
9. Norsk Hydro Datenbank „NHMg.db (ext.)“, Norsk Hydro Research Centre Porsgrunn, 1996.
10. Keiner, K. U. 2003. **Magnesium Alloys and Technologies**. Weinheim: Wiley-VCH.

11. Harsono, Charis Sonny. 2006. **Karakteristik Kekuatan Fatik Pada Paduan Aluminium Tuang**. Semarang: Universitas Negeri Semarang.
12. Atmaja, Gusti Randa. 2011. **Analisis Sifat Mekanik Penambahan Unsur Cu Pada Coran Aluminium**. Makassar: Universitas Hasanuddin.
13. Vogel. 1997. **Textbook Of Macro and Semimicro Qualitatif Inorganic Analysis** - fifth edition.
14. Gupta, Manoj., Ling, Sharon Nai Mui. 2011. **Magnesium, Magnesium Alloys and Magnesium composite**. Wiley-VCH: New Jersey: Wiley-VCH.
15. ASM Metal Handbook vol. 3. "Alloy Phase Diagrams". ASM International The Materials Information Society
16. Pouya Sharifi, "*Structure-Property Relationships of Magnesium Alloys*", 2012.
17. Avedesian, M. M., Baker, H. 1999. **ASM Specialty Handbook—Magnesium and Magnesium Alloys**. Materials Park, OH: ASM International.
18. Al Badar, Sinai Parsih., dan Sutarsis. 2014. **Pengaruh Penambahan Kalsium pada Paduan Mg-5Al terhadap Struktur Mikro, Kekerasan, dan Stabilitas Termal sebagai Aplikasi Engine Block**. Surabaya: ITS Press.
19. Atmoko, Prasetya Dwi., dan Sutarsis. 2014. **Pengaruh Temperatur Aging dan Waktu Holding Aging terhadap Struktur Mikro, Sifat Mekanik, dan Ketahanan Termal pada Presipitasi Hardening Paduan Mg6Zn0.5Y sebagai Aplikasi Engine Block**. Surabaya: ITS Press.
20. Rosalie, M J. 2012. **The effect of precipitation on strength and ductility in a Mg-Zn-Y alloy**. Kobe City: Dept. Mechanical Engineering, Kobe University.
21. Serwe, G. 1962. **Magnesiumgußteile im Volkswagen**. Dusseldorf: VDI-Berichte Nr. 58, VDI-Verlag.
22. Callister, W D. 2003. **Materials Science and Engineering: An introduction**. NewYork: Wiley & Sons.

23. Jayaraj, J., dkk. 2010. **Enhanced Precipitation Hardening of Mg-Ca Alloy by Al Addition.** Tsukuba: National Institute for Materials.

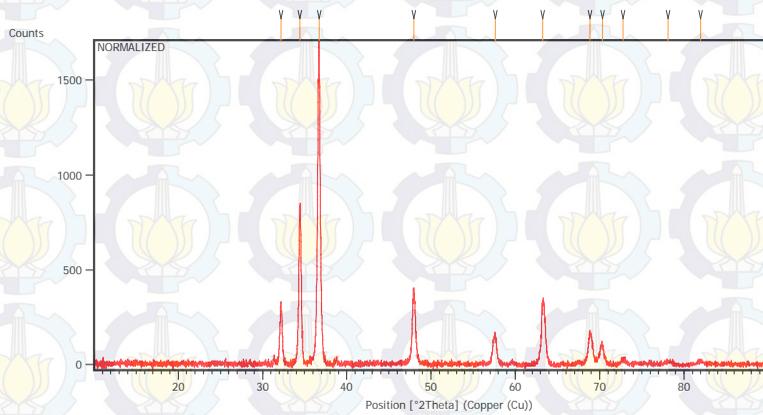




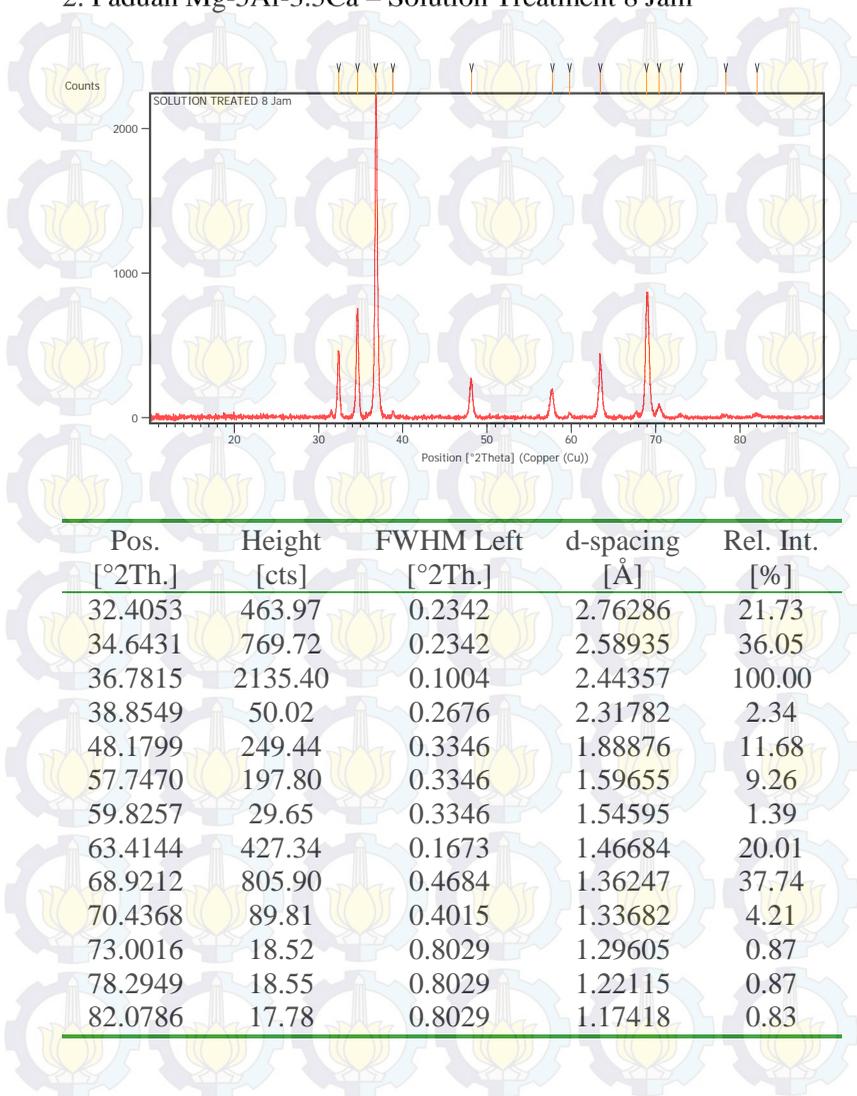
LAMPIRAN

Hasil Pengujian XRD

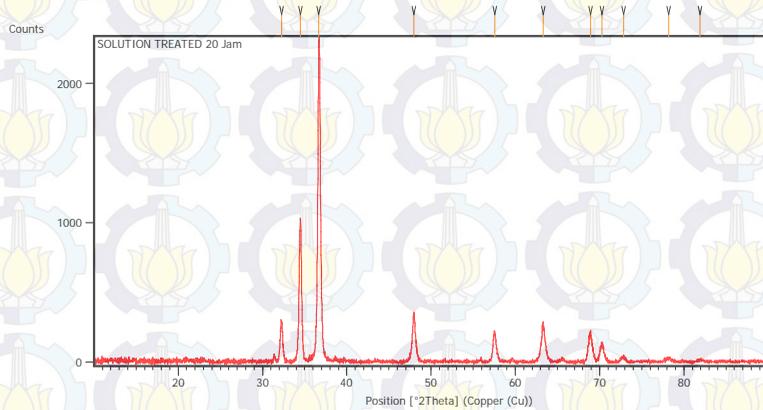
1. Paduan Mg-5Al-3.5Ca tanpa perlakuan (*as-cast*)



2. Paduan Mg-5Al-3.5Ca – Solution Treatment 8 Jam

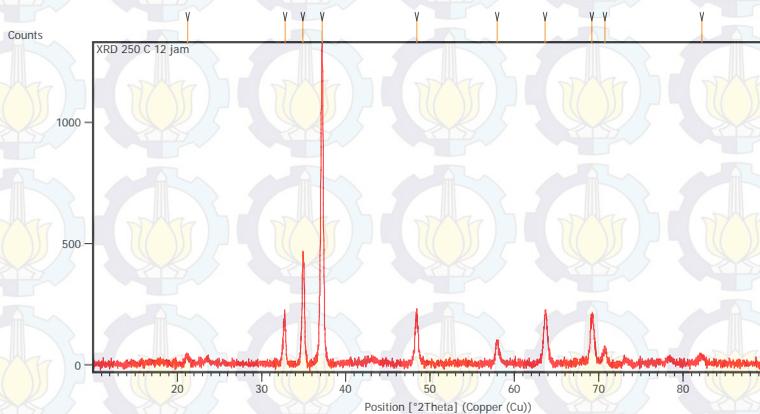


3. Paduan Mg-5Al-3.5Ca – Solution Treatment 20 Jam



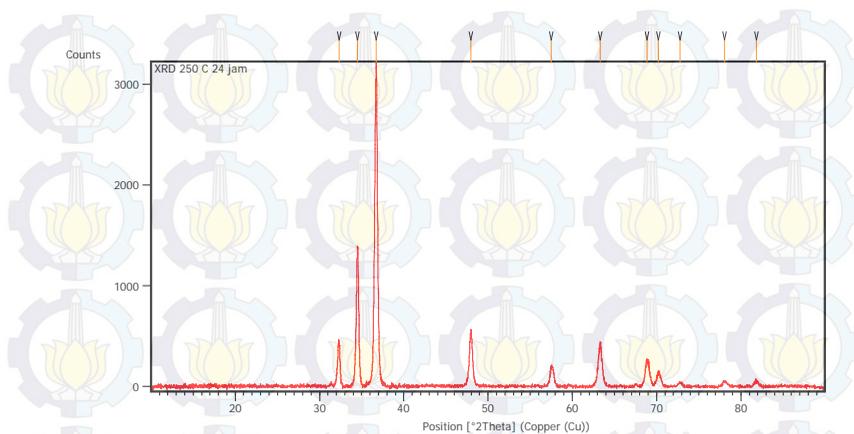
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
32.2743	294.62	0.3346	2.77378	13.04
34.5077	996.60	0.2175	2.59920	44.10
36.6824	2259.97	0.1171	2.44995	100.00
47.9539	348.84	0.3346	1.89714	15.44
57.5756	205.88	0.4015	1.60089	9.11
63.3117	256.64	0.4015	1.46897	11.36
68.9170	217.53	0.3011	1.36254	9.63
70.3004	135.06	0.4015	1.33908	5.98
72.8325	34.17	0.5353	1.29864	1.51
78.1833	27.16	0.8029	1.22262	1.20
81.8920	16.38	0.8029	1.17638	0.72

4. Paduan Mg-5Al-3.5Ca – 250°C Aging 12 Jam



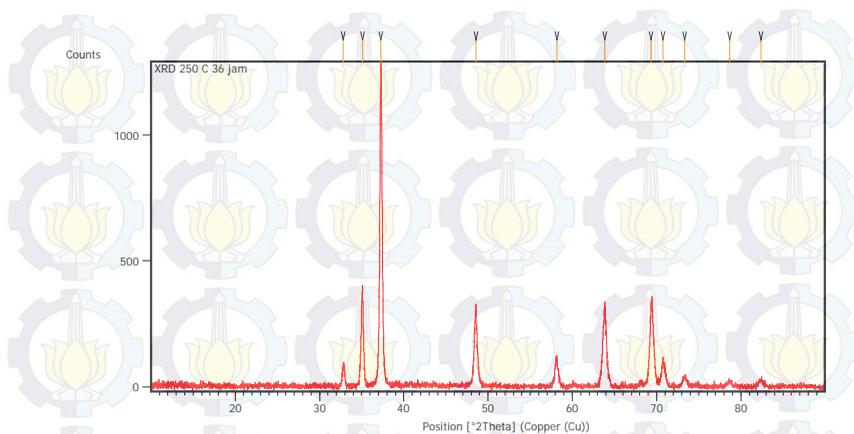
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
21.2343	32.45	0.5353	4.18429	2.54
32.7859	191.78	0.3011	2.73165	15.02
34.9155	448.17	0.3011	2.56977	35.11
37.2178	1276.48	0.3011	2.41592	100.00
48.4184	195.62	0.3011	1.88002	15.33
57.9465	91.52	0.3346	1.59153	7.17
63.6615	216.85	0.3346	1.46174	16.99
69.1787	187.67	0.4684	1.35802	14.70
70.7241	64.77	0.4015	1.33209	5.07
82.2372	29.18	0.8029	1.17231	2.29

5. Paduan Mg-5Al-3.5Ca – 250°C Aging 24 Jam



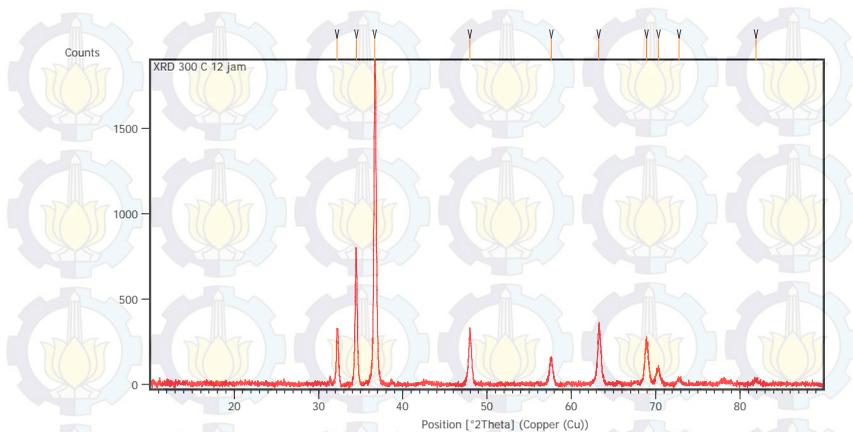
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
32.3532	437.95	0.2676	2.76719	13.53
34.4865	1402.21	0.1506	2.60075	43.31
36.7383	3237.76	0.1673	2.44634	100.00
47.9638	553.06	0.3680	1.89677	17.08
57.5057	184.27	0.4684	1.60267	5.69
63.3429	425.42	0.1673	1.46832	13.14
68.8357	265.91	0.5353	1.36395	8.21
70.2296	148.20	0.5353	1.34025	4.58
72.7908	40.05	0.5353	1.29929	1.24
78.0824	53.27	0.5353	1.22395	1.65
81.8218	57.85	0.6022	1.17721	1.79

6. Paduan Mg-5Al-3.5Ca – 250°C Aging 36 Jam



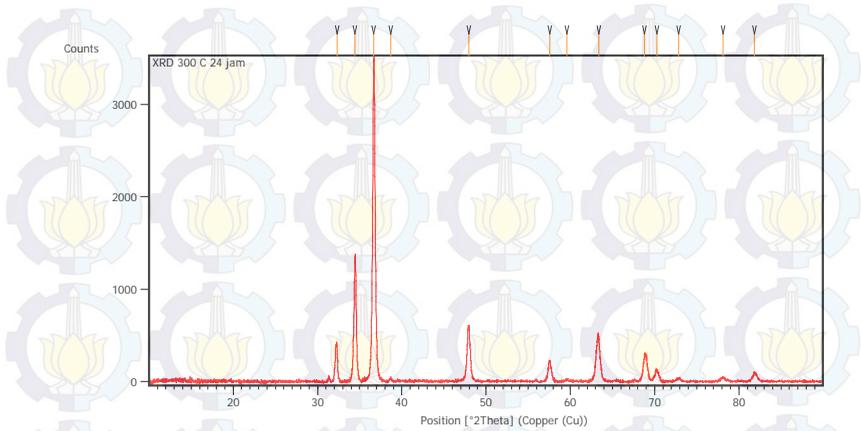
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
32.8351	91.27	0.2007	2.72768	7.10
35.0749	379.96	0.2342	2.55845	29.58
37.2703	1284.69	0.2175	2.41264	100.00
48.5588	307.54	0.1338	1.87491	23.94
58.1523	105.35	0.3346	1.58638	8.20
63.8281	294.97	0.4684	1.45832	22.96
69.3060	288.05	0.3011	1.35584	22.42
70.7571	99.40	0.4684	1.33155	7.74
73.3487	36.03	0.5353	1.29078	2.80
78.6853	19.55	0.5353	1.21607	1.52
82.3620	29.30	0.5353	1.17085	2.28

7. Paduan Mg-5Al-3.5Ca – 300°C Aging 12 Jam



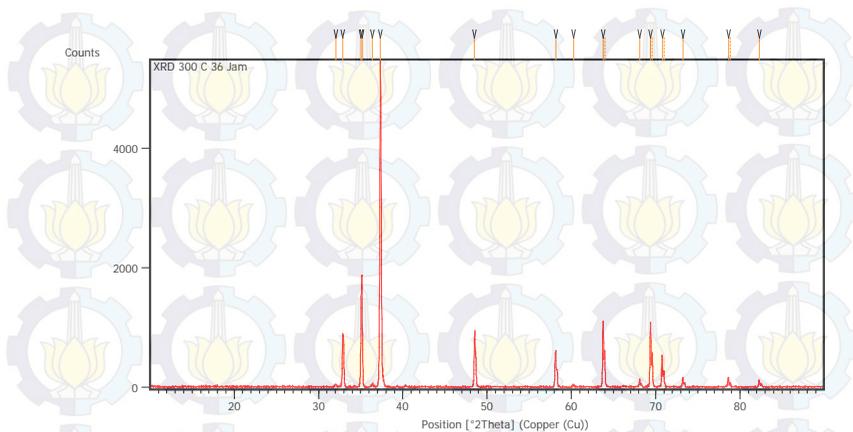
Pos. [$^{\circ}2\theta$.]	Height [cts]	FWHM Left [$^{\circ}2\theta$.]	d-spacing [\AA]	Rel. Int. [%]
32.2263	330.91	0.2007	2.77780	17.56
34.4633	804.37	0.2676	2.60244	42.67
36.6748	1884.97	0.1338	2.45044	100.00
47.9753	322.60	0.3011	1.89634	17.11
57.6011	153.19	0.4015	1.60025	8.13
63.2635	334.41	0.2342	1.46997	17.74
68.9479	230.40	0.4684	1.36200	12.22
70.3393	94.07	0.4684	1.33843	4.99
72.7713	33.62	0.4015	1.29959	1.78
81.9247	22.84	0.8029	1.17599	1.21

8. Paduan Mg-5Al-3.5Ca – 300°C Aging 24 Jam



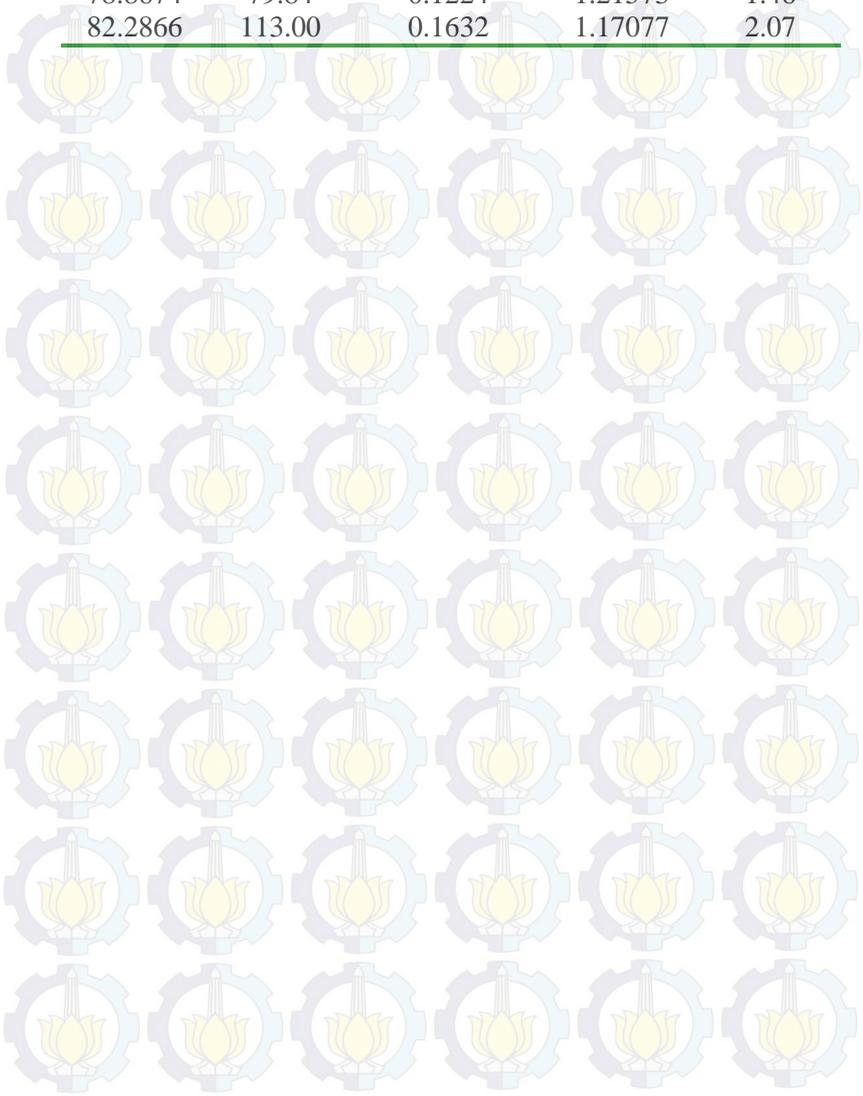
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
32.3017	419.09	0.2676	2.77149	11.91
34.4499	1353.67	0.2175	2.60343	38.47
36.6644	3518.44	0.2007	2.45111	100.00
38.6898	36.76	0.4015	2.32733	1.04
47.9774	594.42	0.3346	1.89626	16.89
57.5666	231.34	0.3011	1.60112	6.57
59.5947	15.98	0.8029	1.55139	0.45
63.3763	461.13	0.4349	1.46762	13.11
68.8171	294.78	0.3346	1.36427	8.38
70.2639	128.97	0.4015	1.33969	3.67
72.8402	29.43	0.6691	1.29853	0.84
78.0965	45.66	0.4015	1.22376	1.30
81.8579	96.47	0.3346	1.17678	2.74

9. Paduan Mg-5Al-3.5Ca – 300°C Aging 36 Jam



Pos. [$^{\circ}2\theta$.]	Height [cts]	FWHM Left [$^{\circ}2\theta$.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
32.0356	48.81	0.2007	2.79390	0.90
32.8805	903.70	0.0836	2.72401	16.57
35.0606	1475.87	0.0816	2.55735	27.07
35.1520	1884.52	0.0669	2.55302	34.56
36.3758	69.06	0.2676	2.46989	1.27
37.3394	5452.64	0.1506	2.40834	100.00
48.5123	832.65	0.1171	1.87660	15.27
58.1519	611.87	0.1338	1.58639	11.22
60.2355	25.79	0.4015	1.53641	0.47
63.7802	1104.63	0.1224	1.45809	20.26
63.9579	612.99	0.1020	1.45808	11.24
68.0865	114.68	0.1224	1.37598	2.10
69.4005	1098.75	0.1428	1.35310	20.15
69.6038	546.64	0.1020	1.35300	10.03
70.7919	497.04	0.1224	1.32988	9.12
70.9899	241.35	0.1224	1.32995	4.43
73.2282	158.41	0.1020	1.29153	2.91

78.6425	160.92	0.1428	1.21562	2.95
78.8674	79.84	0.1224	1.21573	1.46
82.2866	113.00	0.1632	1.17077	2.07



Tabel Perhitungan Intensitas Fase

Perlakuan	Intensitas Total (%)		
	α Mg	Mg ₁₇ Al ₁₂	Mg ₂ Ca
As-Cast	48.35	22.13	18.83
	48.65		6.06
	100.00		
	8.50		
9.34			
Jumlah	214.84	22.13	24.89

Perlakuan	Intensitas Total (%)		
	α Mg	Mg ₁₇ Al ₁₂	Mg ₂ Ca
Solution Treatment 8 Jam	21.73	11.68	20.01
	36.05		4.21
	100.00		
	9.26		
	37.74		
Jumlah	204.78	11.68	24.22

Perlakuan	Intensitas Total (%)		
	α Mg	Mg ₁₇ Al ₁₂	Mg ₂ Ca
Solution Treatment 20 Jam	13.04	15.44	11.36
	44.10		5.98
	100.00		
	9.11		
	9.63		
Jumlah	175.88	15.44	17.34

Perlakuan	Intensitas Total (%)		
	α Mg	Mg ₁₇ Al ₁₂	Mg ₂ Ca
Aging 250C 12 Jam	15.02	15.33	16.99
	35.11		5.07
	100.00		
	7.17		

	14.70		
Jumlah	172	15.33	22.06

Perlakuan	Intensitas Total (%)		
	α Mg	Mg ₁₇ Al ₁₂	Mg ₂ Ca
	13.53	17.08	13.14
Aging	43.31		4.58
250C	100.00		
24 Jam	5.69		
	8.21		
Jumlah	170.74	17.08	17.72

Perlakuan	Intensitas Total (%)		
	α Mg	Mg ₁₇ Al ₁₂	Mg ₂ Ca
	7.10	23.94	22.96
Aging	29.58		7.74
250C	100.00		
36 Jam	8.20		
	22.42		
Jumlah	167.3	23.94	30.70

Perlakuan	Intensitas Total (%)		
	α Mg	Mg ₁₇ Al ₁₂	Mg ₂ Ca
	17.56	17.11	17.74
Aging	42.67		4.99
300C	100.00		
12 Jam	8.13		
	12.22		
Jumlah	180.58	17.11	22.33

Perlakuan	Intensitas Total (%)		
	α Mg	Mg ₁₇ Al ₁₂	Mg ₂ Ca
	11.91	16.89	20.26
Aging	38.47		4.43
300C	100.00		
24 Jam			

	6.57		
	8.38		
Jumlah	165.33	16.89	24.69
	Intensitas Total (%)		
Perlakuan	αMg	Mg₁₇Al₁₂	Mg₂Ca
	16.57	15.27	20.26
Aging	34.56		4.43
300C	100.00		
36 Jam	11.22		
	20.15		
Jumlah	182.45	15.27	24.69



(halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Hafiz Heryansyah dilahirkan di Jakarta pada tanggal 26 Agustus 1992. Penulis merupakan anak pertama dari tiga bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SD Negeri Malaka Jaya 05 Jakarta, SMP Negeri 139 Jakarta, dan SMA Negeri 8 Jakarta. Lulus SMA tahun 2010, penulis melanjutkan pendidikan perguruan tinggi di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif di organisasi Badan Eksekutif Mahasiswa Fakultas Teknologi Industri (BEM FT) ITS sebagai Kepala Departemen Hubungan Luar (2013-2014). Semasa kuliah penulis juga melakukan kegiatan kerja praktik di PT. GMF AeroAsia. Kegiatan perkuliahannya diakhiri dengan melakukan penelitian yang dijadikan Tugas Akhir dengan judul **“Pengaruh Temperatur Aging dan Waktu Holding Aging terhadap Perubahan Struktur Mikro dan Sifat Mekanik pada Presipitasi Hardening Paduan Mg-5Al-3.5Ca”**.

Email: hafizheryansyah@gmail.com