



**TUGAS AKHIR - TL 141584**

**STUDI PENGARUH WAKTU *DEGASSING* DAN LAJU PENDINGINAN TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN POROSITAS PADA PENGECORAN PADUAN ALUMINIUM 6061 DENGAN METODE *SAND CASTING***

**BOBY ALEXANDER  
NRP 02511440000112**

**Dosen Pembimbing:  
Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc.  
Alvian Toto Wibisono, S.T., M.T.**

**DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2018**

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



TUGAS AKHIR - TL 141584

***EFFECT OF DEGASSING TIME AND COOLING RATE ON MICROSTRUCTURE AND POROSITY OF ALUMINUM 6061 ALLOY USING SAND CASTING METHOD***

BOBY ALEXANDER  
NRP 0251144000112

Dosen Pembimbing:  
Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc.  
Alvian Toto Wibisono, S.T., M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2018

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

**STUDI PENGARUH WAKTU *DEGASSING* DAN  
LAJU PENDINGINAN TERHADAP STRUKTUR  
MIKRO DAN POROSITAS PADA PENGECORAN  
PADUAN ALUMINIUM 6061 DENGAN METODE  
*SAND CASTING***

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Program Studi S-1 Departemen Teknik Material  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**BOBY ALEXANDER**  
NRP. 02511440000112

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc. .... (Pembimbing I)

Alvian Toto Wibisono S.T., M.T. .... (Pembimbing II)



*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

**STUDI PENGARUH WAKTU *DEGASSING* DAN  
LAJU PENDINGINAN TERHADAP STRUKTUR  
MIKRO DAN POROSITAS PADA PENGECORAN  
PADUAN ALUMINIUM 6061 DENGAN METODE  
*SAND CASTING***

**Nama Mahasiswa** : **Boby Alexander**  
**NRP** : **02511440000112**  
**Departemen** : **Teknik Material**  
**Dosen pembimbing** : **Wikan Jatimurti, S.T, M.Sc**  
**Co-pembimbing** : **Alvian Toto Wibisono, S.T, M.T**

**ABSTRAK**

Paduan aluminium banyak digunakan dalam dunia industri seperti pada pembangkit tenaga, militer, konstruksi, barang sehari-hari serta dalam bidang transportasi termasuk pada industri pesawat terbang. Hal ini karena paduan aluminium memiliki sifat mekanik dan ketahanan korosi yang baik serta berat spesifik yang rendah. Proses *degassing* (2 menit, 5 menit dan 8 menit) dan modifikasi laju pendinginan (13 °C/menit, 20 °C/menit dan 26 °C/menit) dilakukan untuk mengurangi porositas dan ukuran *Dendrite Arm Spacing* (DAS) yang lebih kecil. Metode pengecoran yang digunakan adalah *sand casting* dan peleburan menggunakan *electric furnace* pada temperatur 720 °C. Struktur mikro paduan menunjukkan ukuran DAS berkurang dari 137,3 µm menjadi 87,58 µm. Tingkat porositas turun dari 3,58% pada waktu *degassing* 2 menit dan laju pendinginan 13 °C/menit menjadi 1,8% pada waktu *degassing* 5 menit dan laju pendinginan 26 °C/menit. Hasil pengujian kekuatan tarik menunjukkan bahwa nilai kekuatan tarik naik ketika ukuran DAS dan tingkat porositas semakin kecil. Nilai kekuatan tarik paling tinggi adalah 105,9 dan paling rendah adalah 70,53 MPa.

*Kata kunci* : aluminium, *degassing*, laju pendinginan, struktur mikro, porositas, kekuatan

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

# **EFFECT OF DEGASSING TIME AND COOLING RATE ON MICROSTRUCTURE AND POROSITY OF ALUMINUM 6061 ALLOY USING SAND CASTING METHOD**

**Student's Name** : **Boby Alexander**  
**NRP** : **02511440000112**  
**Department** : **Teknik Material**  
**Advisor Lecturer** : **Wikan Jatimurti, S.T, M.Sc**  
**Co-advisor** : **Alvian Toto Wibisono, S.T, M.T**

## **ABSTRACT**

Aluminum alloys are widely used in many industries such as power generator, military, construction and transportation including the aircraft industry. This is because aluminum alloys have good mechanical properties and corrosion resistance as at the same time also giving a low specific weight. The degassing process (2 minutes, 5 minutes and 8 minutes) and cooling rate modifications (13 °C / min, 20 °C / min and 26 °C / min) were performed to reduce both the porosity and the size of Dendrite Arm Spacing (DAS). The casting method used in this research is sand casting and raw material were melted using electric furnace at 720 °C. The microstructural images showed the dendrite arm spacing size are decreased by size from 137.3 μm to 87.58 μm obtained from cooling rates of 13 °C / min and 26 °C / min respectively. In the other hand, the level of porosity are also decreased from 3.58% at 2 min degassing and the cooling rate of 13 °C / min to 1.8% at 5 min degassing and 26 °C / min cooling rate. Furthermore, the tensile test results shows that the value of tensile strength increases when the DAS size and porosity level are smaller. The highest ultimate tensile strength value is 105.9 and the lowest is 70,53 MPa.

*Keyword : aluminum, degassing, cooling rate, microstructure, porosity, tensile*

*(This page is intentionally left blank)*

## KATA PENGANTAR

Segala puji dan kemuliaan bagi Tuhan Yesus Kristus yang telah memberikan rahmat, anugerah serta karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir serta menyusun laporan Tugas Akhir dengan judul “**Studi Pengaruh Waktu Degassing dan Laju Pendinginan terhadap Struktur Mikro dan Porositas pada Pengecoran Paduan Aluminium 6061 dengan Metode Sand Casting**”. Laporan tugas akhir ini dibuat untuk melengkapi Mata Kuliah Tugas Akhir yang menjadi salah satu syarat kelulusan mahasiswa di Departemen Teknik Material Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penulis sadar bahwa tanpa bantuan dan dukungan dari berbagai pihak, laporan tugas akhir ini tidak akan terselesaikan dengan baik. Oleh karena itu penulis ingin menyampaikan rasa terimakasih kepada pihak-pihak yang telah mendukung dan membantu, diantaranya:

1. Orang tua, kakak-kakak dan keluarga besar yang telah memberikan banyak doa, dukungan, semangat, cinta kasih dan inspirasi.
2. Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc sebagai dosen pembimbing 1 dan Alvian Toto Wibisono, S.T., M.T selaku dosen pembimbing 2.
3. Dr. Agung Purniawan, ST., M,Eng selaku Ketua Departemen Teknik Material FTI – ITS.
4. Dr. Eng. Hosta Ardhyanta ST., M.Sc. selaku Koordinator Tugas Akhir Departemen Teknik Material FTI-ITS.
5. Mas Irfan Purbawanto Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D selaku dosen wali yang sangat mengayomi dan membimbing selama menjalani pendidikan di Departemen Teknik Material ITS.
6. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Material FTI-ITS khususnya Pak Anto yang membantu dalam proses pengerjaan teknis tugas akhir ini.
7. Keluarga besar MT 16 yang mendampingi dan menemani selama masa pendidikan di Departemen Teknik Material ITS.

8. Seluruh pihak yang belum bisa dituliskan satu per satu oleh penulis.

Penulis berharap laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi seluruh pihak yang membaca. Penulis juga menyadari masih terdapat banyak kekurangan dalam penulisan laporan tugas akhir ini, sehingga penulis sangat menerima kritik dan saran dari para pembaca yang dapat membangun demi kesempurnaan laporan tugas akhir ini.

Surabaya, 4 Juli 2018  
Penulis,

Boby Alexander  
NRP. 02511440000112

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL .....</b>	<b>i</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN .....</b>	<b>v</b>
<b>ABSTRAK.....</b>	<b>vii</b>
<b>KATA PENGANTAR .....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xvii</b>
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	<b>xxi</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2.1 Penggunaan Aluminium pada Struktur Badan Pesawat ...	5
2.2 Aluminium.....	6
2.3 Silikon .....	7
2.4 Magnesium .....	8
2.5 Paduan Aluminium 6061 .....	9
2.6 Diagram Fasa.....	12
2.6.1 Diagram Fasa Al-Si .....	12
2.6.2 Diagram Fasa Al-Mg .....	13
2.6.3 Diagram Fasa Al-Mg-Si.....	15
2.7 Pengecoran .....	16
2.8 Cetakan Pasir .....	18
2.9 Toleransi .....	20
2.9.1 Toleransi Penyusutan .....	20
2.9.2 Toleransi Permesinan.....	21
2.9.3 Toleransi <i>Draft</i> .....	21
2.10 Porositas pada Paduan Aluminium.....	22
2.11 Degassing .....	26
2.12 <i>Dendrite Arm Spacing (DAS)</i> .....	29
2.13 Kajian Penelitian Sebelumnya.....	32

2.13.1 Pengaruh Laju Pendinginan terhadap DAS dan Struktur Mikro .....	32
2.13.2 Pengaruh Laju Pendinginan terhadap Porositas .....	34
2.13.3 Pengaruh Ukuran DAS terhadap Porositas dan Kekuatan Tarik .....	36
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN</b>	
3.1 Diagram Alir Penelitian .....	39
3.2 Material yang Digunakan .....	42
3.3 Peralatan yang Digunakan .....	45
3.4 Variabel Penelitian.....	48
3.5 Prosedur Penelitian .....	48
3.5.1 Prosedur Preparasi Bahan .....	48
3.5.2 Prosedur Preparasi Cetakan .....	52
3.5.3 Prosedur Pengecoran.....	54
3.6 Proses Pengujian.....	54
3.6.1 Pengujian Komposisi .....	54
3.6.2 Pengujian Metalografi.....	57
3.6.3 Pengujian Tarik.....	59
3.6.4 Pengujian XRD .....	61
3.6.5 Pengujian Densitas.....	63
3.7 Rancangan Penelitian.....	64
<b>BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN</b>	
4.1 Pengamatan Hasil Coran Paduan Aluminium 6061 .....	67
4.2 Hasil Pengujian Kekuatan Tarik Paduan Aluminium.....	69
4.3 Hasil Pengujian Komposisi Kimia Paduan Aluminium ..	72
4.4 Hasil Pengujian XRD Paduan Aluminium 6061 .....	73
4.5 Hasil Pengujian Metalografi Paduan Aluminium 6061 ..	76
4.5.1 Pengaruh Laju Pendinginan terhadap DAS.....	81
4.5.2 Pengaruh Ukuran DAS terhadap UTS .....	83
4.6 Hasil Pengujian Tingkat Porositas Paduan Aluminium..	85
4.6.1 Pengaruh Tingkat Porositas terhadap UTS .....	88
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN</b>	
5.1 Kesimpulan .....	91
5.2 Saran .....	91
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>xxi</b>

<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>xxv</b>
<b>BIODATA PENULIS.....</b>	<b>lix</b>

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b> Beberapa Aluminium Seri 6xxx dan Penggunaannya ( <i>ASM Specialty Handbook</i> , 2014) .....	9
<b>Gambar 2.2</b> Struktur Mikro <i>Homogenized</i> Al-6061 dengan Mg <sub>2</sub> Si yang Tak Terlarut ( <i>ASM International</i> , 1984) .....	11
<b>Gambar 2.3</b> Struktur Mikro Al 6061 (a) Batas Butir Triangular; (b) Fasa Eutektik pada Batas Butir (Wang et al, 2013).....	11
<b>Gambar 2.4</b> Diagram Fasa Al-Si ( <i>ASM Metals Handbook</i> Vol. 3).....	13
<b>Gambar 2.5</b> Diagram Fasa Al-Mg ( <i>ASM Metals Handbook</i> Vol.3).....	14
<b>Gambar 2.6</b> Potongan Diagram Fasa <i>Ternary</i> Al-Mg-Si (Glazoff, 2007) .....	16
<b>Gambar 2.7</b> Dua Jenis Porositas pada paduan aluminium (a) <i>Gas Porosity</i> ; (b) <i>Shrinkage Porosity</i> (Felberbaum, 2010).....	24
<b>Gambar 2.8</b> Kelarutan Hidrogen dalam Aluminium.....	25
<b>Gambar 2.9</b> Tingkat Porositas terhadap Kekuatan Tarik Paduan Aluminium ( <i>ASM Metals Handbook</i> Vol. 15) ....	26
<b>Gambar 2.10</b> Gas Removal Ratio pada Aluminium di 750 °C (Sigworth, 2014).....	27
<b>Gambar 2.11</b> Ilustrasi Proses <i>Rotary Degassing</i> .....	28
<b>Gambar 2.12</b> Pengaruh Ukuran Dendrit terhadap Sifat Mekanik A356-T62 .....	30
<b>Gambar 2.13</b> Ilustrasi DAS, DCS dan DCI .....	31
<b>Gambar 2.14</b> Pengaruh Laju Solidifikasi terhadap DAS Paduan Aluminium 6xxx (Anyalebechi, 2004) .....	32
<b>Gambar 2.15</b> Pengaruh Laju Pendinginan terhadap DAS Paduan Aluminium A356 (Zhang et al., 2007) .....	33

<b>Gambar 2.16</b> Struktur Mikro Aluminium A356 (a) medium fasa transisi (b) medium pendinginan air (Zhang et al., 2007).....	34
<b>Gambar 2.17</b> Pengaruh Waktu Pendinginan terhadap Ukuran Porositas Paduan Aluminium A356 (Major, 2002) .....	35
<b>Gambar 2.18</b> Pengaruh Laju Pendinginan terhadap Fraksi Volume Porositas Paduan Aluminium A356 (Beckermann et al, 2007).....	36
<b>Gambar 2.19</b> Pengaruh DAS terhadap Porositas (Zhang et al., 2000).....	37
<b>Gambar 2.20</b> Pengaruh DAS terhadap Kekuatan Tarik Paduan Aluminium A356 (Zhang et al., 2008).....	38
<b>Gambar 3.1</b> Diagram Alir Penelitian .....	41
<b>Gambar 3.2</b> Paduan Al-Si .....	43
<b>Gambar 3.3</b> Ingot Aluminium.....	43
<b>Gambar 3.4</b> Ingot Magnesium .....	44
<b>Gambar 3.5</b> Dimensi Spesimen Uji Tarik.....	45
<b>Gambar 3.6</b> Ilustrasi Media Pendingin pada Cetakan Pasir (a) Tampak Belakang dan (b) Tampak Atas .....	53
<b>Gambar 3.7</b> Prinsip Pengujian OES.....	56
<b>Gambar 3.8</b> Bagian yang Diambil untuk Spesimen Uji Komposisi.....	57
<b>Gambar 3.9</b> Mikroskop Optik OLYMPUS BX51M-RF.....	58
<b>Gambar 3.10</b> Mekanisme Pengukuran Dendrite Arm Spacing (DAS) pada dendrit yang Terbentuk pada Struktur Mikro .....	59
<b>Gambar 3.11</b> Alat Uji Tarik GOTECH GT-7001-LC50.....	61
<b>Gambar 3.12</b> Alat Uji XRD PANalytical Xpert Pro .....	62
<b>Gambar 3.13</b> Pengukuran Volume Spesimen pada Pengujian Densitas .....	64

<b>Gambar 4.1</b> Paduan Aluminium Hasil Coran (a)Tampak Atas;(b) Tampak Depan.....	67
<b>Gambar 4.2</b> Paduan Aluminium Hasil Coran setelah dimachining (a) Tampak Atas; (b) Tampak Depan .....	69
<b>Gambar 4.3</b> Nilai Ultimate Tensile Strength Paduan Aluminium Hasil Coran .....	70
<b>Gambar 4.4</b> Hasil XRD Paduan Aluminium Hasil Coran dengan waktu degassing (a) 2 menit; (b) 5 menit; (c) 8 menit.....	74
<b>Gambar 4.5</b> Hasil Pengamatan Struktur Mikro Paduan Aluminium 6061 (a) Dt2/CR13; (b) Dt2/CR20; (c) Dt2/CR26 pada perbesaran 50 kali.....	77
<b>Gambar 4.6</b> Hasil Pengamatan Struktur Mikro Paduan Aluminium 6061 (a) Dt5/CR13; (b) Dt5/CR20; (c) Dt5/CR26 pada perbesaran 50 kali .....	79
<b>Gambar 4.7</b> Hasil Pengamatan Struktur Mikro Paduan Aluminium 6061(a) D t8/CR13; (b) Dt8/CR20; (c) Dt8/CR26 pada perbesaran 50 kali.....	80
<b>Gambar 4.8</b> Grafik Hubungan antara Ukuran DAS dengan UTS Paduan Aluminium Hasil Coran .....	84
<b>Gambar 4.9</b> Tingkat Porositas pada Paduan Aluminium 6061 Hasil Coran.....	86
<b>Gambar 4.10</b> Grafik Hubungan antara Tingkat Porositas dan Nilai Kekuatan Tarik Paduan .....	89

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b> Paduan Umum yang digunakan pada Pesawat Terbang (Rambabu et al, 2017).....	6
<b>Tabel 2.2</b> Karakteristik dan Sifat Mekanik Logam Aluminium (Groover,2010).....	7
<b>Tabel 2.3</b> Karakteristik dan Sifat Mekanik Silikon (Groover, 2010).....	8
<b>Tabel 2.4</b> Karakteristik dan Sifat Mekanik Magnesium (Groover, 2010).....	8
<b>Tabel 2.5</b> Komposisi Kimia Aluminium 6061(ASM <i>Specialty Handbook</i> , 2014).....	10
<b>Tabel 2.6</b> Karakteristik dan Sifat Mekanik Aluminium 6061-T6 (ASM <i>Metals Handbook Vol.2</i> ) .....	10
<b>Tabel 2.7</b> Bahan-Bahan Penyusun Cetakan Pasir (Banga, 1981).....	19
<b>Tabel 2.8</b> Toleransi Penyusutan Beberapa Logam Cor (Banga, 1981).....	20
<b>Tabel 2.9</b> <i>Machining Allowance</i> (Rao, 2001).....	21
<b>Tabel 2.10</b> Nilai <i>Draft Allowance</i> (Rao, 2001).....	22
<b>Tabel 3.1</b> Rancangan Penelitian .....	65
<b>Tabel 4.1</b> Hasil Pengukuran Dimensi dan Berat Hasil Coran.....	68
<b>Tabel 4.2</b> Data Hasil Pengujian Tarik Paduan Aluminium .....	70
<b>Tabel 4.3</b> Kenaikan UTS berdasarkan Laju Pendinginan.....	71
<b>Tabel 4.4</b> Komposisi Kimia Paduan Aluminium 6061 Hasil Coran.....	72
<b>Tabel 4.5</b> Perhitungan Ukuran Dendrite Arm Spacing (DAS) Paduan Aluminium.....	81
<b>Tabel 4.6</b> Pengaruh Tingkat Porositas terhadap UTS.....	88

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Paduan aluminium merupakan salah satu logam *non-ferrous* yang paling banyak digunakan dalam dunia industri seperti pada pembangkit tenaga, militer, konstruksi, barang sehari-hari serta dalam bidang transportasi. Pemakaian aluminium dalam bidang transportasi dapat memberikan banyak kelebihan seperti mengurangi massa keseluruhan dari struktur yang dibuat sehingga dapat memaksimalkan efisiensi energi. Begitu pula pada penggunaan aluminium sebagai rangka struktur pada pesawat terbang. Penggunaannya yang membutuhkan kekuatan, keuletan, ketahanan korosi dan berat spesifik yang rendah dalam satu kemasan membuat paduan aluminium menjadi salah satu material pilihan untuk hal tersebut. Salah satu paduan aluminium yang paling banyak digunakan dalam pembuatan kerangka struktur pesawat terbang adalah paduan aluminium 6061. Pemilihan material ini didasarkan kepada beberapa faktor seperti kekuatan, keuletan, kemudahan manufaktur, ketahanan korosi dan kekuatan lelah yang baik (Soler, 2014). Paduan aluminium 6061 sendiri merupakan paduan aluminium dengan unsur paduan utama berupa magnesium sebanyak 0,8-1,2% dan silikon sebanyak 0,4-0,8% (ASM *Specialty Handbook*, 1994).

Terlepas dari semua kelebihan sifat mekanik yang dimiliki paduan aluminium 6061 ini, terdapat beberapa kekurangan yang menjadi tantangan bagi peneliti yang harus diselesaikan dalam proses pengecoran paduan aluminium. Salah satunya adalah porositas yang muncul pada hasil coran (Major, 2002). Porositas hampir selalu muncul pada pengecoran aluminium dan hal ini sangatlah merugikan khususnya terhadap sifat mekanik hasil coran (Campbell, 2003). Hidrogen, sebagai satu-satunya gas yang diketahui



memiliki solubilitas yang tinggi terhadap paduan aluminium cair namun sangat rendah terhadap paduan padat aluminium menjadi sumber utama penyebab munculnya porositas tersebut. Pada proses solidifikasi paduan, gas hidrogen mengalami penolakan dari butir padat yang bertumbuh dan memaksa hidrogen untuk menuju daerah yang masih cair pada *mushy zone*. Ketika konsentrasi hidrogen melebihi solubilitas pada suatu daerah maka porositas akan cenderung terbentuk (Han et al., 2002). Pada larutan padat aluminium, porositas yang disebabkan hidrogen secara teoritis dapat dikurangi dengan mengurangi konsentrasi hidrogen dan meningkatkan laju solidifikasi sehingga dapat menekan formasi dan pertumbuhan titik gas (ASM *Metals Handbook* Vol. 15, 2002). Di sisi lain, banyak cara yang telah dikembangkan untuk mengurangi konsentrasi hidrogen dalam proses pengecoran paduan aluminium, salah satunya adalah pemberian fluks gas murni nitrogen, argon, klorin atau freon. Proses yang kerap dinamakan dengan *degassing* ini mengurangi konten hidrogen dalam aluminium cair dengan difusi tekanan parsial.

Oleh karena porositas ini menjadi masalah yang tidak dapat diabaikan begitu saja, maka dirasa perlu diadakannya penelitian lebih lanjut mengenai minimalisasi porositas khususnya dengan variasi waktu *degassing* dan laju solidifikasi paduan aluminium untuk mengurangi tingkat porositas yang terjadi khususnya untuk *sand casting*. Kemudian juga akan dilihat mengenai pengaruhnya terhadap sifat mekanik dan struktur mikro paduan.

## 1.2 Perumusan Masalah

Rumusan masalah yang menjadi bahasan pada penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh waktu *degassing* dan laju pendinginan terhadap struktur mikro paduan aluminium 6061?



2. Bagaimana pengaruh waktu *degassing* dan laju pendinginan terhadap porositas pada paduan aluminium 6061?
3. Bagaimana pengaruh waktu *degassing* dan laju pendinginan terhadap kekuatan tarik paduan aluminium 6061?

### 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisa pengaruh variasi waktu *degassing* dan laju pendinginan terhadap struktur mikro paduan aluminium 6061?
2. Menganalisa pengaruh variasi waktu *degassing* dan laju pendinginan terhadap porositas pada paduan aluminium 6061?
3. Menganalisa pengaruh variasi waktu *degassing* dan laju pendinginan terhadap kekuatan tarik paduan aluminium 6061?

### 1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Panas yang terbuang selama proses peleburan diabaikan.
2. Reaksi antara logam cair dengan oksigen diabaikan.
3. Reaksi antara cetakan pasir dengan logam diabaikan.
4. Distribusi paduan dianggap homogen.
5. Tekanan dianggap konstan pada saat peleburan.
6. Kelembapan pasir dianggap terkontrol dan memenuhi standar.
7. Laju pendinginan yang digunakan adalah laju pendinginan yang terukur dari penggunaan media pendingin yang berbeda.



### 1.5 Manfaat Penelitian

Pada penelitian ini akan diketahui pengaruh variasi waktu *degassing* dan laju pendinginan terhadap nilai kekuatan tarik, porositas dan struktur mikro paduan aluminium 6061. Paduan aluminium 6061 yang terbentuk dari proses pengecoran ini diharapkan mampu memberikan pengetahuan yang lebih baik mengenai porositas pada paduan aluminium dan bermanfaat sebagai literatur maupun pengembangan penelitian lainnya pada keilmuan material dan metalurgi khususnya untuk aplikasi struktur kerangka badan pesawat terbang.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Penggunaan Aluminium pada Struktur Badan Pesawat**

Aluminium telah menjadi material utama pada struktur pesawat terbang sejak material ini menggantikan penggunaan kayu pada tahun 1920-an. Karakteristik aluminium yang dapat memberikan sifat mekanik yang cukup baik dengan beratnya yang ringan serta harga yang relatif lebih murah membuat aluminium sangat banyak dipakai untuk aplikasi pada pesawat terbang. Menurut Chun (1988), secara umum pemilihan material struktur pada pesawat terbang didasarkan pada beberapa pertimbangan yang meliputi:

- a. Efisiensi kekuatan statis
- b. *Fatigue Strength*
- c. Ketangguhan perpatahan dan pertumbuhan retakan
- d. Ketahanan korosi dan penggetasan
- e. Stabilitas terhadap lingkungan

Beberapa paduan aluminium yang sering digunakan dalam struktur pesawat terbang adalah Aluminium 7075, Aluminium 6061, Aluminium 6063, Aluminium 2024 dan Aluminium 5052 (Soler, 2014). Tabel 2.1 memperlihatkan komposisi kimia dari beberapa paduan aluminium yang digunakan dalam pesawat terbang.



**Tabel 2.1** Paduan Umum yang digunakan pada Pesawat Terbang (Rambabu et al, 2017)

Paduan	Cu	Mg	Zn	Mn	Si	Fe	Cr	Ti
AA 2024	3.8-4.9	1,2-1,8	0,2 5	0,9	0,5	0,5	0,1	0,15
AA5052	-	2,5	-	-	-	-	0,25	-
<b>AA6061</b>	<b>0,15-0,4</b>	<b>0,8-1,2</b>	<b>0,2 5</b>	<b>0,15</b>	<b>0,4-0,8</b>	<b>0,7</b>	<b>0,35</b>	<b>0,15</b>
AA6063	-	0,7	-	-	0,4	-	-	-
AA7075	1,2-2,0	2,1-2,9	6,1	0,3	0,4	0,5	-	0,1

Perkembangan pesat dialami aluminium sejak 1920 termasuk perkembangan penelitian pada komposisi kimia, control impuritas dan efek proses perlakuan panas. Perkembangan penelitian material aluminium terhadap tegangan *yield* yang terus dilakukan dalam beberapa tahun terakhir. Yang terbaru adalah AA7085 yang merupakan paduan aluminium dengan lithium dan Duralumin (AA2017) yang memiliki tegangan *yield* 280 MPa (Rambabu et al, 2017).

## 2.2 Aluminium

Aluminium merupakan salah satu logam *nonferrous* yang memiliki massa jenis yang rendah yaitu  $2,7 \text{ g/cm}^3$ , dimana jika dibandingkan dengan baja sangat jauh. Beberapa keunggulan dari aluminium adalah memiliki sifat konduktivitas listrik yang sangat baik ( $0,53 \text{ cal/cm}^{\circ}\text{C}$ ), konduktivitas thermal yang tinggi ( $376,600/\text{ohm/cm}$ ) serta memiliki sifat ketahanan korosi terhadap lingkungan (Callister, 2013).

Aluminium adalah logam yang banyak ditemukan pengaplikasiannya dalam kehidupan sehari-hari. Aluminium termasuk kedalam logam yang ringan namun memiliki sifat mekanik yang cukup bagus antara lain



memiliki sifat tahan korosi, konduktivitas listrik, dan panas yang tinggi. Akan tetapi dalam keadaan murni aluminium memiliki kekuatan yang rendah, untuk itu dalam penggunaan aplikasinya aluminium biasanya dipadu dengan unsur lain untuk memperbaiki dan meningkatkan sifat mekaniknya. Berikut merupakan karakteristik dan sifat mekanik dari logam aluminium yang diperlihatkan pada Tabel 2.2 (Groover,2010).

**Tabel 2.2** Karakteristik dan Sifat Mekanik Logam Aluminium (Groover,2010)

<i>Properties</i>	<i>Value</i>
<i>Density (g/cm<sup>3</sup>)</i>	2.70
<i>Crystal Structure</i>	FCC
<i>Hardness (HB)</i>	20
<i>Yield Strength (MPa)</i>	28
<i>Tensile Strength (UTS) (MPa)</i>	69
<i>Modulus Of Elasticity (MPa)</i>	69 X 10 <sup>3</sup>

### 2.3 Silikon

Silikon merupakan unsur semi logam dalam tabel periodik. Silikon adalah satu unsur logam yang paling melimpah di kerak bumi sekitar 26 %. Unsur ini memiliki struktur kristal yang sama seperti berlian, namun kekerasannya lebih rendah. Beberapa karakteristik yang dimiliki silikon antara lain tergolong kedalam logam yang semikonduktor, ringan, serta kuat namun rapuh. Berikut merupakan karakteristik dan sifat mekanik dari logam silikon dapat dilihat pada Tabel 2.3. (Groover,2010)



**Tabel 2.3** Karakteristik dan Sifat Mekanik Silikon  
(Groover, 2010)

<i>Properties</i>	<i>Value</i>
<i>Density (g/cm<sup>3</sup>)</i>	2.30
<i>Crystal Structure</i>	<i>Diamond Cubic</i>
<i>Hardness (HV)</i>	1000-1200
<i>Tensile Strength (UTS) (MPa)</i>	113
<i>Modulus Of Elasticity (MPa)</i>	115 X 10 <sup>3</sup>

## 2.4 Magnesium

Magnesium merupakan salah satu logam yang ringan namun memiliki sifat mekanik yang bagus seperti aluminium. Salah satu karakteristik pada logam magnesium selain ringan juga relatif lunak. Namun logam ini tidak memiliki kekuatan yang cukup untuk sebagian besar aplikasi teknik. Namun sifat tersebut dapat diperbaiki dengan menambah unsur lain ataupun memberikan perlakuan panas sehingga dapat meningkatkan dan memperbaiki sifat mekaniknya. Berikut akan dijelaskan beberapa karakteristik yang dimiliki logam magnesium pada Tabel 2.4. (Groover,2010)

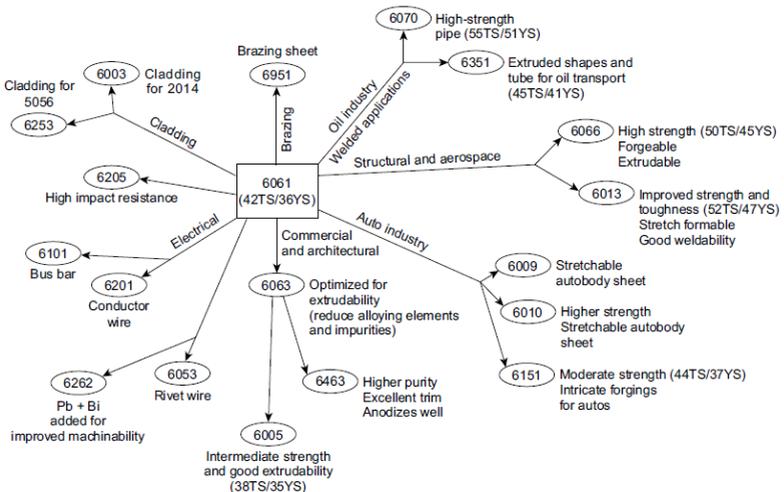
**Tabel 2.4** Karakteristik dan Sifat Mekanik  
Magnesium (Groover, 2010)

<i>Properties</i>	<i>Value</i>
<i>Density (g/cm<sup>3</sup>)</i>	1.74
<i>Crystal Structure</i>	HCP
<i>Hardness (HB)</i>	20
<i>Yield Strength (MPa)</i>	45
<i>Tensile Strength (UTS) (MPa)</i>	150
<i>Modulus Of Elasticity (MPa)</i>	48 X 10 <sup>3</sup>



## 2.5 Paduan Aluminium 6061

Paduan aluminium dengan kode 6xxx merupakan paduan yang mengandung silikon dan magnesium dalam proporsi yang dibutuhkan untuk membentuk fasa  $Mg_2Si$ , yang membuatnya dapat diberi perlakuan panas (Davis, 2014). Dalam paduan ini Mg dan Si adalah penghasil larutan padat yang berfungsi sebagai penguat dengan membentuk presipitasi. Meskipun paduan ini tidak sekuat seri 2xxx dan seri 7xxx, seri 6xxx memiliki kemampuan yang lebih baik untuk dibentuk, dilas, diberi perlakuan mesin dan ketahanan korosi yang lebih baik. Gambar 2.1 menunjukkan hubungan antara beberapa paduan aluminium seri 6xxx yang sering digunakan.



**Gambar 2.1** Beberapa Aluminium Seri 6xxx dan Penggunaannya (ASM *Specialty Handbook*, 2014)



Secara khusus paduan aluminium 6061 memiliki komposisi kimia yang dapat dilihat pada Tabel 2.5 dibawah ini.

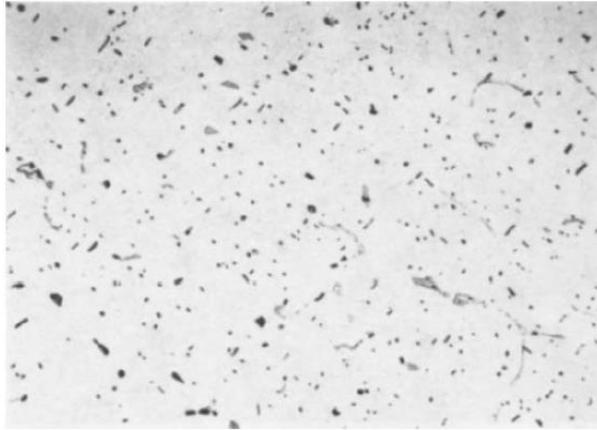
**Tabel 2.5** Komposisi Kimia Aluminium 6061  
(ASM Specialty Handbook, 2014)

Element	Mg	Si	Cu	Mn	Fe	Cr	Zn	Al
(wt%)	0.8-1.2	0.4-0.8	0.15-0.4	0.15 max	0.7 max	0.04-0.35	0.25 max	Bal

Sedangkan karakteristik dan sifat mekanik dari paduan aluminium 6061 dapat terlihat pada Tabel 2.6 dibawah ini.

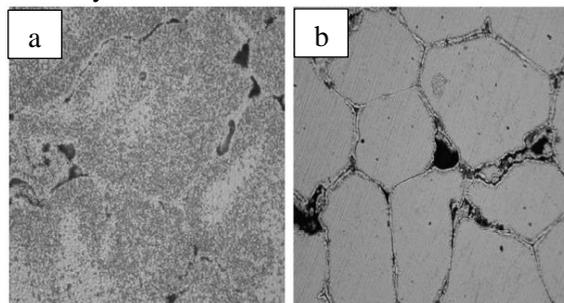
**Tabel 2.6** Karakteristik dan Sifat Mekanik  
Aluminium 6061-T6 (ASM Metals Handbook Vol.2)

<i>Properties</i>	<i>Value</i>
<i>Density (g/cm<sup>3</sup>)</i>	2.70
<i>Crystal Structure</i>	FCC
<i>Yield Strength (MPa)</i>	155
<i>Tensile Strength (UTS) (MPa)</i>	296
<i>Modulus Of Elasticity (MPa)</i>	68,9 X 10 <sup>3</sup>



**Gambar 2.2** Struktur Mikro *Homogenized* Al-6061 dengan  $Mg_2Si$  yang Tak Terlarut (ASM International, 1984)

Gambar 2.2 menunjukkan struktur mikro yang telah dilakukan homogenisasi dengan  $Mg_2Si$  yang tak terlarut. Gambar ini menunjukkan bahwa  $Mg_2Si$  terbentuk dalam bentuk presipitat dan pada hasil struktur mikro terlihat dalam bentuk titik-titik hitam yang tersebar pada matriks fasa utama yaitu fasa  $\alpha$ -Aluminium.



**Gambar 2.3** Struktur Mikro Al 6061 (a) Batas Butir Triangular; (b) Fasa Eutektik pada Batas Butir (Wang et al, 2013)



Gambar 2.3 menunjukkan hasil struktur mikro paduan aluminium 6061. Pada gambar (a) terlihat interpretasi batas butir pada paduan aluminium dan (b) memperlihatkan fasa eutektik yang terbentuk pada batas butir paduan aluminium 6061 (Wang et al, 2013).

## 2.6 Diagram Fasa

### 2.6.1 Diagram Fasa Al-Si

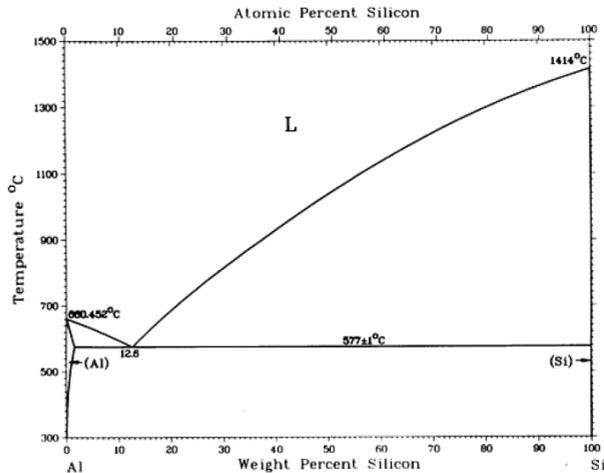
Paduan Al-Si memiliki sifat mampu cor yang baik, tahan korosi, dapat diproses dengan permesinan dan dapat dilas. Kandungan silikon pada diagram fasa Al-Si ini terdiri dari 3 macam yaitu :

- a. Hipoeutektik yaitu apabila terdapat kandungan silikon  $< 11.7\%$  dimana struktur akhir yang terbentuk pada fasa ini adalah struktur alpha kaya aluminium, dengan struktur eutektik sebagai tambahan.
- b. Eutektik yaitu apabila kandungan silikon yang terkandung didalamnya sekitar  $11.7\%$  sampai  $12.2\%$  Pada komposisi ini paduan Al-Si dapat membeku secara langsung ( dari fasa cair ke padat ).
- c. Hipereutektik yaitu apabila komposisi silikon diatas  $12.2\%$  sehingga kaya akan silikon dengan fasa eutektik sebagai fasa tambahan. Keberadaan struktur kristal silikon primer pada daerah ini mengakibatkan karakteristik yaitu meningkatkan ketahanan aus paduan dan ekspansi thermal yang rendah serta memiliki ketahanan retak panas (*hot tearing*) yang baik.

Fungsi lain dari unsur silikon dapat mereduksi koefisien ekspansi termal dari paduan aluminium. Selama pemanasan terjadi, pemuai volume paduan



tidak terlalu besar. Hal ini menjadi sangat penting saat proses pendinginan (ASM *Specialty Handbook*, 2014). Gambar 2.4 menunjukkan diagram fasa dari paduan aluminium-silikon.



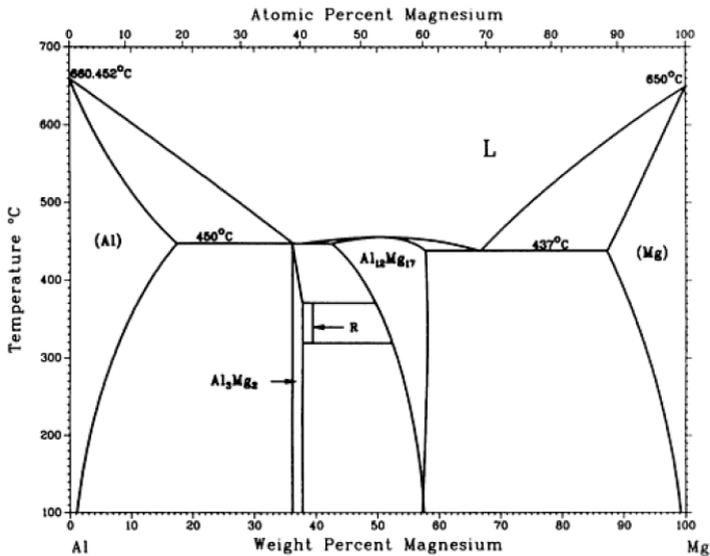
**Gambar 2.4** Diagram Fasa Al-Si (ASM *Metals Handbook Vol. 3*)

### 2.6.2 Diagram Fasa Al-Mg

Gambar 2.5 merupakan diagram fasa paduan aluminium-magnesium. Pada diagram fasa, garis komposisi pertama (95% Al dan 5% Mg). Dari diagram fasa di atas kita dapat menganalisa, bahwa suatu paduan senyawa yang terdiri dari kira-kira 95% Al dan 5% Mg dipanaskan secara perlahan dari temperatur ruang hingga 650°C. Maka fasa yang terjadi selama proses pemanasan berlangsung pada temperatur ruang hingga 220°C terbentuk fasa  $\alpha$  Al + AlMg $\beta$  (kaya struktur ferrite (alpha Al), untuk temperatur 220°C hingga 595°C terbentuk fasa  $\alpha$  Al, Untuk temperatur 595°C hingga 635°C terbentuk fasa *liquid* + Al, dan untuk temperatur 635°C hingga 650°C terbentuk fasa *liquid* (Al-Mg), Sedangkan



pada diagram fasa di atas untuk garis komposisi kedua (80% Al dan 20% Mg). Dari diagram fasa dibawah kita dapat menganalisa, bahwa suatu paduan senyawa yang terdiri dari kira-kira 80% Al dan 20% Mg dipanaskan secara perlahan dari temperatur ruang hingga 650°C. Maka fasa yang terjadi selama proses pemanasan berlangsung pada temperatur ruang hingga 426°C terbentuk fasa  $\alpha$  Al + AlMg $\beta$  (kaya struktur AlMg $\beta$ ), untuk temperatur 426°C hingga 550°C terbentuk fasa *liquid* + Al, Untuk temperatur 550°C hingga 650°C terbentuk fasa *liquid*.

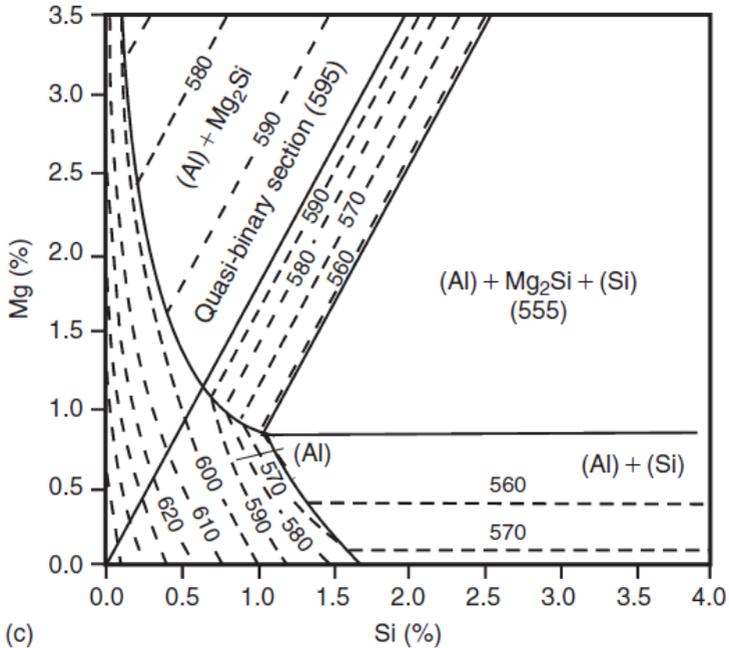


**Gambar 2.5** Diagram Fasa Al-Mg (ASM Metals Handbook Vol.3)



### 2.6.3 Diagram Fasa Al-Mg-Si

Pada gambar 2.6 memperlihatkan diagram fasa ternary dari paduan aluminium-magnesium-silikon. Pada diagram fasa dibawah untuk garis komposisi pertama (98,5% Al dan 1,5%  $Mg_2Si$ ). Dari diagram fasa dibawah dapat dianalisa suatu paduan senyawa yang terdiri dari kira-kira 98,5% Al dan 1,5%  $Mg_2Si$  dipanaskan secara perlahan dari temperatur ruang hingga  $680^{\circ}C$ . Fasa yang terbentuk selama proses pemanasan berlangsung pada temperatur ruang hingga  $630^{\circ}C$  adalah fasa  $\alpha$  Al, untuk temperatur  $630^{\circ}C$  hingga  $655^{\circ}C$  terbentuk fasa *liquid* + Al, untuk temperatur  $655^{\circ}C$  hingga  $680^{\circ}C$  terbentuk fasa *liquid*. Sedangkan pada garis komposisi kedua dapat dianalisa suatu paduan senyawa yang terdiri dari kira-kira 95% Al dan 5%  $Mg_2Si$  dipanaskan secara perlahan dari temperatur ruang hingga  $680^{\circ}C$ . Maka fasa yang terbentuk selama proses pemanasan berlangsung pada temperatur ruang hingga  $590^{\circ}C$  terbentuk fasa  $\alpha$  Al, dan fasa  $Al_3Mg_2$ , untuk temperatur  $590^{\circ}C$  hingga  $635^{\circ}C$  terbentuk fasa *liquid* + Al, Untuk temperatur  $553^{\circ}C$  hingga  $650^{\circ}C$  terbentuk fasa *liquid*.



**Gambar 2.6** Potongan Diagram Fasa *Ternary* Al-Mg-Si (Glazoff, 2007)

## 2.7 Pengecoran

Pengecoran merupakan suatu proses logam cair mengalir ke dalam cetakan dengan cara gravitasi maupun diberi gaya lainnya, kemudian logam cair membeku sesuai dengan bentuk cetakan. Prinsip utama dari pengecoran yaitu melebur logam, menuangkan ke dalam cetakan, dan membiarkan hingga membeku. Proses pengecoran adalah salah satu proses yang sederhana dan proses langsung untuk mendapatkan bentuk yang diinginkan. Proses ini membutuhkan cetakan yang diinginkan sesuai bentuk dan logam cair. Pengecoran yang biasa dilakukan adalah penuangan logam cair ke



cetakan pasir. Tujuan dari proses pengecoran ini adalah memproduksi produk yang digunakan manusia (Hadi, 2008).

Kemampuan dan kelebihan dari pengecoran menurut Groover (2010) adalah sebagai berikut:

1. Pengecoran dapat digunakan untuk membuat geometri bagian yang kompleks, termasuk bentuk eksternal dan internal.
2. Beberapa proses pengecoran mampu menghasilkan komponen hingga bentuk bersih. Tidak ada operasi manufaktur lebih lanjut yang diperlukan untuk mencapai geometri dan dimensi komponen yang dibutuhkan. Proses pengecoran lainnya berada di dekat bentuk bersih, yang memerlukan beberapa bentuk pengolahan tambahan (biasanya permesinan) untuk mencapai dimensi dan rincian yang akurat.
3. Pengecoran bisa digunakan untuk menghasilkan bagian yang sangat besar.
4. Proses pengecoran dapat dilakukan pada logam yang dapat dipanaskan sampai keadaan cair. Beberapa metode pengecoran sangat sesuai untuk produksi massal.

Pengecoran sendiri dapat dibedakan menjadi beberapa kategori sesuai dengan proses individual yang berbeda (ASM *Metals Handbook* Vol. 15). Kategori tersebut adalah:

1. Proses pencetakan konvensional (*green sand, shell, flaskless molding*)
2. Proses pencetakan presisi (*investment casting, permanent mold, die casting*)
3. Proses pencetakan spesial (*vacuum molding, evaporative pattern casting, centrifugal casting*)



4. Proses pencetakan pasir dengan ikatan kimia (*no-bake, sodium silicate*)
5. Proses pencetakan inovatif (*rheocasting, squeeze casting, electroslag casting*)

## 2.8 Cetakan Pasir

Pasir cetak memerlukan sifat-sifat yang memenuhi persyaratan sebagai berikut (Surdia, 2000):

1. Mempunyai sifat yang mampu dibentuk sehingga mudah dalam pembuatan cetakan dengan kekuatan yang sesuai. Cetakan yang dihasilkan harus kuat sehingga tidak rusak karena dipindah-pindah dan dapat menahan logam cair waktu dituang kedalamnya. Oleh karena itu kekuatannya pada temperatur kamar dan kekuatan panasnya sangat diperlukan.
2. Permeabilitas yang baik. Dikhawatirkan bahwa hasil coran mempunyai cacat seperti rongga penyusutan, gelembung gas atau kekasaran permukaan, kecuali jika udara atau gas yang terjadi dalam cetakan waktu penuangan disalurkan melalui rongga-rongga diantara butir-butir pasir keluar dari cetakan dengan kecepatan yang sesuai.
3. Distribusi besar butir yang baik. Permukaan coran menjadi lebih halus jika coran dibuat dalam cetakan yang berbutir halus. Tetapi jika butir pasir terlalu halus, gas dicegah keluar dan membuat cacat, yaitu gelembung udara. Distribusi besar butir harus sesuai mengingat dua syarat yang disebut diatas.
4. Tahan terhadap temperatur logam yang dituang. Butir pasir dan pengikat harus mempunyai derajat tahan api tertentu



terhadap temperatur tinggi, jika logam cair dengan temperatur tinggi ini dituang kedalam cetakan.

5. Komposisi yang cocok. Butir pasir bersentuhan dengan logam yang dituang mengalami peristiwa kimia dan fisika karena logam cair mempunyai temperatur yang tinggi. Bahan-bahan yang tercampur yang mungkin menghasilkan gas atau larut dalam logam adalah tidak dikehendaki.

Cetakan biasanya dibuat dengan memadatkan pasir. Pasir yang dipakai biasanya pasir alam atau pasir buatan yang mengandung tanah lempung. Cetakan pasir mudah dibuat dan tidak mahal. Pasir yang digunakan kadang-kadang dicampur pengikat khusus, misalnya air-kaca, semen, resin furan, resin fenol atau minyak pengering, karena penggunaan zat-zat tersebut memperkuat cetakan atau mempermudah operasi pembuatan cetakan. Tabel 2.7 menunjukkan komposisi umum bahan-bahan penyusun cetakan pasir.

**Tabel 2.7** Bahan-Bahan Penyusun Cetakan Pasir  
(Banga, 1981)

No	Bahan	Presentase (%)
1	Pasir Silika dengan AFS <i>fineness</i>	81,5 %
2	Bentonit	16%
3	<i>Graphite</i>	2%
4	<i>Corn flour</i>	0,5%
5	Kadar Air	4-5%

Logam yang dapat digunakan pada pengecoran ini adalah besi, baja, tembaga, perunggu, kuningan, aluminium ataupun logam paduan (Alian,2013).



## 2.9 Toleransi

### 2.9.1 Toleransi Penyusutan

Logam yang dipakai dalam proses pengecoran akan mengalami penyusutan ukuran seiring dengan terjadinya pendinginan. Untuk menanggulangi fenomena ini, maka pola dan cetakan harus dibuat lebih besar dari ukuran aslinya, hal ini disebut juga dengan *shrinkage allowance*. *Shrinkage allowance* sendiri memiliki aturan sendiri dan ukurannya berbeda untuk setiap logam. Ukuran penyusutan ini biasanya disajikan dalam bentuk millimeter untuk setiap meter dari benda cor. Misalnya untuk setiap pengecoran 1 meter baja, maka ukuran pola harus dibuat lebih besar 1 mm. Penyajian ukuran penyusutan ini juga dapat dalam bentuk persentase. Toleransi penyusutan ini nantinya berpengaruh ke naiknya berat total logam yang dicor. Toleransi penyusutan dari beberapa logam disajikan pada Tabel 2.8.

**Tabel 2.8** Toleransi Penyusutan Beberapa Logam Cor (Banga, 1981)

No	Logam	Pengecilan (%)	Pengecilan (mm per meter)
1	Baja	2,0	20
2	Kuningan	1,4	14
3	Aluminium	1,8	18
4	Paduan aluminium	1,3 - 1,6	13 - 16
5	Tembaga	1,05 - 2,1	10,5 - 21
6	Magnesium	1,8	18
7	Seng	2,5	24



### 2.9.2 Toleransi Permesinan

Pada proses pengecoran dengan *sand casting* didapatkan hasil akhir yang umumnya jelek (permukaan masih kasar) dan dimensi coran belum akurat. Untuk mendapatkan hasil yang bagus dan dimensi yang akurat dilakukan proses *machining*. Oleh karena itu, dengan proses *machining* maka akan ada bagian yang dihilangkan agar mendapatkan coran yang baik. *Machining allowance* tergantung dengan logam coran, tipe cetakan yang digunakan, dan kompleksitas permukaan benda corannya. Hal ini dilihat pada Tabel 2.9.

**Tabel 2.9** *Machining Allowance* (Rao, 2001)

Dimension (mm)		Allowance (mm)		
		Bore	Surface	Cope side
Cast iron	Up to 300	3	3	5,5
	301-500	5	4	6
	501-900	6	5	6
	Up to 150	3	3	6
Cast steel	151-500	6	5,5	7
	501-900	7	6	9
	Up to 200	2	1,5	2
Non ferrous	201-300	2,5	1,5	3
	301-900	3	2,5	3

### 2.9.3 Toleransi Draft

Ketika pola (*pattern*) diletakan di pasir, akan terjadi kontak antara permukaan pola dan pasir. Ketika pola di ambil atau dilepaskan dari pasir, gesekan antar permukaan pola dan pasir



menyebabkan pasir dapat runtuh atau terkikis. Oleh karena itu, diperlukan *pattern* yang memiliki sudut agar memudahkan untuk mengambil *pattern* dari pasir. Tiap material *pattern* memiliki *draft allowance* yang berbeda dan juga tiap ketinggian *pattern* memiliki nilai *draft* yang berbeda. Ini ditunjukkan dengan Tabel 2.10.

**Tabel 2.10** Nilai *Draft Allowance* (Rao, 2001)

<i>Pattern material</i>	<i>Height of the given surface (mm)</i>	<i>Draft angle of surface (degrees)</i>	
		<i>External surface</i>	<i>Internal surface</i>
<i>Wood</i>	20	3	3
	21-50	1,5	2,5
	51-100	1	1,5
	101-300	0,75	1
	201-300	0,5	1
	301-800	0,5	0,75
	801-2000	0,35	0,5
	<i>Over 2000</i>	-	0,25
<i>Metal and plastic</i>	20	1,5	3
	21-50	1	2
	51-100	0,75	1
	101-200	0,5	0,75
	201-300	0,5	0,75
	301-800	0,35	0,5

## 2.10 Porositas pada Paduan Aluminium

Menurut Hesse (1941), setidaknya ada 2 jenis porositas yang dapat terjadi pada pengecoran paduan non-ferrous diantaranya adalah:

1. *Shrinkage Porosity*. Porositas akibat penyusutan antar kristal. Porositas jenis ini

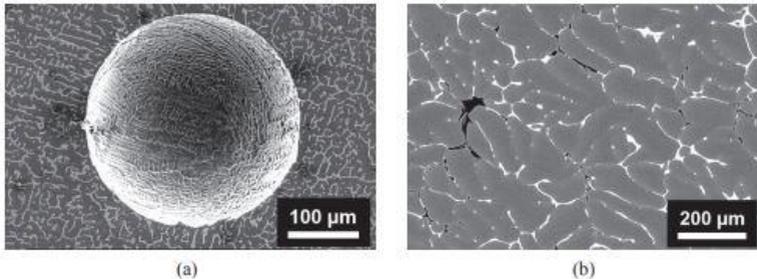


sering dikaitkan dengan lambatnya pengisian oleh logam cair pada bagian-bagian tertentu saat proses pendinginan. Misalnya pada pengecoran tembaga-timah dengan komposisi timah 9%. Selama proses solidifikasi, perunggu yang terbentuk akan mengalami kontraksi ketika membentuk dendrit dan menggunakan ruang yang lebih sedikit dibandingkan dengan ketika masih cair. Hal tersebut akan meninggalkan kekosongan diantara dendrit-dendrit yang terbentuk. Apabila logam cair masih ada disekitar dendrit tersebut, maka kekosongan tersebut akan diisi oleh logam cair tersebut. Namun apabila dengan berbagai alasan pasokan logam cair tersebut terhenti, maka rongga akibat kontraksi akan terbentuk. Porositas ini dapat diatasi dengan mengontrol laju solidifikasi yang dimana hal ini berhubungan dengan temperatur tuang pengecoran. Ketika temperatur tuang dinaikkan hingga diatas batas normal, kontraksi selama pendinginan cenderung lebih besar dibandingkan dengan temperatur tuang dalam batas normal. Akibatnya, rongga akan semakin sulit terisi dengan logam cair dan menghasilkan porositas.

2. *Gas Porosity*. Porositas yang diakibatkan oleh adanya inklusi gas dalam paduan aluminium. Ada beberapa hal yang menyebabkan terjebaknya gas dalam paduan, diantaranya gas yang berasal dari *raw material* ataupun penyerapan gas saat proses peleburan; gas tak terlarut dari cetakan yang terjebak didalam logam paduan saat proses pengecoran;



oksidasi logam pada logam cair mengalami reduksi sehingga membentuk karbonmonoksida dan karbondioksida yang terjebak didalam logam selama proses soldifikasi.

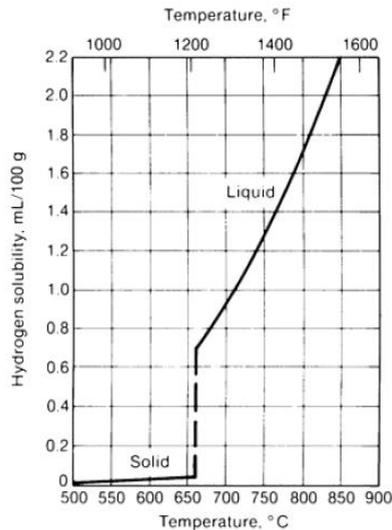


**Gambar 2.7** Dua Jenis Porositas pada paduan aluminium  
(a) *Gas Porosity*; (b) *Shrinkage Porosity* (Felberbaum, 2010)

Gambar 2.7 memperlihatkan jenis porositas yang terlihat pada pengamatan menggunakan *Scanning Electron Microscope* dan *Back-scattered Electron Microscope*. Gambar 2.7 (a) menunjukkan *gas porosity* yang terbentuk dengan bentuk bola atau *spherical* dengan dendrit yang tumbuh disekitarnya. Hal ini mengindikasikan bahwa porositas jenis ini terbentuk sebelum jaringan dendrit terbentuk secara sempurna. Sedangkan Gambar 2.7 (b) memperlihatkan bahwa *shrinkage porosity* terlihat sebagai daerah yang gelap dan terbentuk diantara dendrit primer yang berwarna abu-abu. Selama proses pembekuan, unsur paduan akan membeku dan fase *liquid* terakhir yang membeku akan cenderung membentuk fase eutektik. Ketika fase eutektik ini membeku porositas sering terjadi karena tidak ada lagi *liquid* yang mengisi ruang kosong tersebut (Felberbaum, 2010).



Hidrogen merupakan satu-satunya gas yang terlarut dalam aluminium. Gambar 2.8 menunjukkan kelarutan hidrogen pada aluminium terhadap temperatur. Gambar tersebut menunjukkan bahwa adanya perbedaan yang cukup besar pada kelarutan hidrogen dalam keadaan cair dibandingkan dalam keadaan padat. Di atas *solidus*, kelarutan hidrogen mencapai 0,65 mL/100 g namun dibawah *solidus*, kelarutan hidrogen turun tajam hingga 0,034 mL/100 g. Jumlah ini tentunya bervariasi dengan jumlah paduan (ASM Metals Handbook Vol. 15).



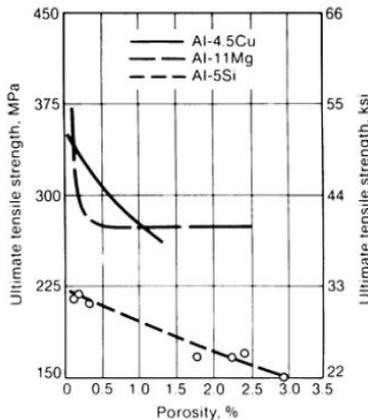
**Gambar 2.8** Kelarutan Hidrogen dalam Aluminium  
(ASM Metals Handbook Vol. 15)

Hal inilah yang menyebabkan selama proses pendinginan dan solidifikasi aluminium, hidrogen yang terlarut akan membentuk presipitat saat kelarutan menjadi sangat rendah. Hidrogen yang tak terlarut inilah yang akhirnya membentuk *void* primer dan sekunder. Pembentukan gelembung gas hidrogen ini dapat dicegah



dengan gaya tekan permukaan, mengontrol laju pendinginan dan mengontrol jumlah hidrogen terlarut dalam logam cair.

Porositas hidrogen yang tersebar secara merata tidak selalu dihindari. Dalam beberapa kasus, presipitasi hidrogen membantu mempertahankan bentuk dan menghindari penyebaran *shrinkage porosity* yang dianggap lebih merugikan dibandingkan porositas hidrogen. Meskipun begitu, porositas hidrogen ini sangatlah mempengaruhi sifat mekanik dari paduan aluminium. Gambar 2.9 menunjukkan hubungan antara porositas dan kekuatan tarik dari beberapa paduan aluminium (ASM *Metals Handbook* Vol. 15).



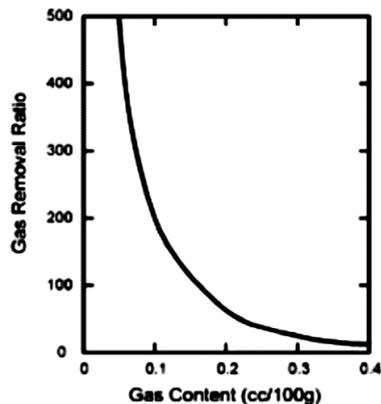
**Gambar 2.9** Tingkat Porositas terhadap Kekuatan Tarik Paduan Aluminium (ASM *Metals Handbook* Vol. 15)

## 2.11 Degassing

Proses *degassing* merupakan proses pembuangan hidrogen dengan memasukkan gas inert seperti argon, nitrogen dan klorin. Proses *degassing* pada logam aluminium cair sepenuhnya memanfaatkan hukum termodinamika. Ketika gas inert dimasukkan kedalam



logam cair, gelembung gas inert akan mengumpulkan gas hidrogen dan dalam waktu bersamaan menuju ke permukaan. Hal yang mungkin terjadi dari mekanisme ini adalah gelembung yang jenuh hidrogen ini meninggalkan logam cair dan tingkat konsentrasi hidrogen pada logam cair menurun. Namun ketika konsentrasi gas menurun, begitu pula dengan kesetimbangan tekanan hidrogen dalam gelembung, sehingga jumlah gas yang dimasukkan harus semakin meningkat. Gambar 2.10 menunjukkan rasio jumlah gas yang dibutuhkan untuk melakukan *degassing* pada temperatur 750 °C. Angka 200 mengartikan bahwa dibutuhkan 200 liter gas inert untuk mengeluarkan 1 liter gas hidrogen. Hal inilah yang membatasi para pelaku pengecoran logam untuk mendapatkan konsentrasi hidrogen yang rendah. Disisi lain, semakin tinggi temperatur operasinya maka kelarutan hidrogen akan meningkat secara eksponensial. Artinya, pada temperatur lebih tinggi dibutuhkan waktu *degassing* yang lebih lama.



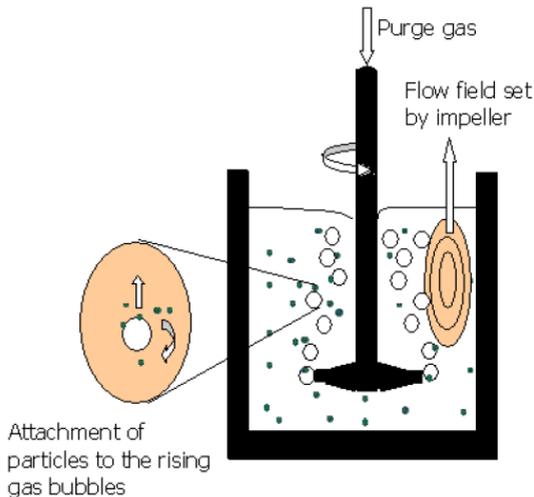
**Gambar 2.10** Gas Removal Ratio pada Aluminium di 750 °C (Sigworth, 2014)



Proses *degassing* yang dilakukan secara konvensional biasanya dilakukan pada salah satu dari tiga proses berikut:

- Pada *ladle transfer*, yang digunakan untuk menghubungkan antara logam cair dengan *holding furnace*.
- Pada *crucible furnace*, biasanya sebelum logam cair dimasukkan kedalam cetakan.
- Pada sistem *in-line*, ketika logam disalurkan kedalam *holding furnace* melalui *launder*.

Gambar 2.11 menunjukkan ilustrasi proses *degassing* dengan menggunakan *rotary impeller*. Pada industri, sangat penting untuk menggunakan desain yang optimum. Hal itu bertujuan untuk mendapatkan gelembung yang kecil dan banyak sehingga meningkatkan efisiensi proses (Sigworth, 2014).

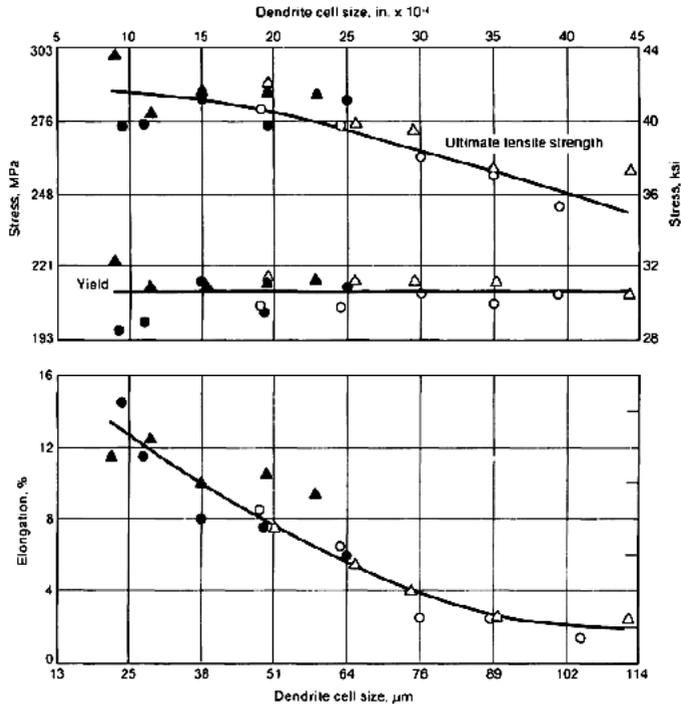


**Gambar 2.11** Ilustrasi Proses *Rotary Degassing*  
(Warke, 2003)



### **2.12 Dendrite Arm Spacing (DAS)**

Sifat mekanik suatu paduan aluminium banyak bergantung pada struktur mikro yang terbentuk dalam paduan tersebut selama proses solidifikasi. Secara umum, struktur mikro suatu paduan aluminium dapat terdiri dari butir, fasa intermetalik, dendrit, porositas akibat penyusutan dan inklusi gas dan segregasi elemen paduan. Meskipun ukuran butir banyak dibicarakan sebagai parameter penting yang membangun suatu sifat mekanik, ternyata dendrit juga memainkan peran yang penting dalam sifat mekanik suatu paduan aluminium. Gambar 2.12 memperlihatkan hubungan antara ukuran sel dendrit terhadap kekuatan tarik dan persen elongasi dari paduan aluminium A356-T62. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa semakin halus dendrit yang dihasilkan, maka semakin baik hasil kekuatan tarik dan persen elongasi yang dihasilkan.



**Gambar 2.12** Pengaruh Ukuran Dendrit terhadap Sifat Mekanik A356-T62 (ASM Metals Handbook Vol. 15)

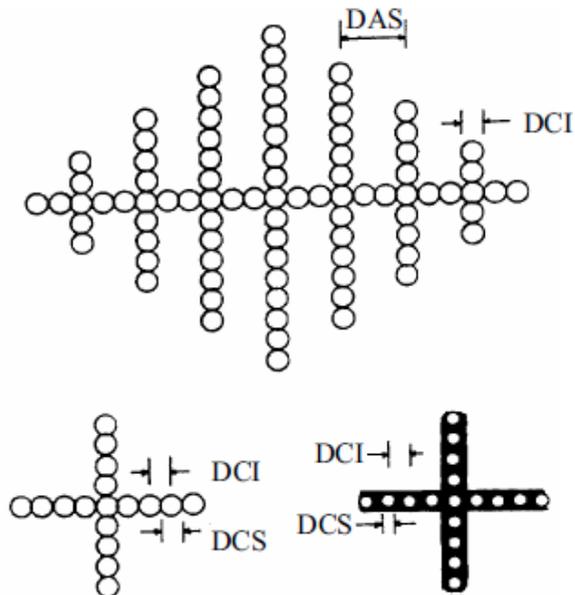
Pengaruh dari *Dendrite Arm Spacing* (DAS) terhadap sifat mekanik suatu paduan dapat dihubungkan dengan fakta bahwa semakin halus ukuran dendrit yang dihasilkan, maka semakin halus pula konstituen intermetalik yang terbentuk serta semakin halus pula ukuran dan fraksi volume dari porositas yang terbentuk (Anyalebechi, 2004).

Ada beberapa metode yang umum dipakai untuk mengukur ukuran sel dendrit atau *arm spacing*:



- Pengukuran terhadap sel dendrit yang dipilih secara manual
- Metode *line intercept*
- Analisis gambar dengan menggunakan bantuan komputer

Gambar 2.13 berikut memperlihatkan secara grafis yang dimaksud dengan *Dendrite Arm Spacing* (DAS), *Dendrite Cell Size* (DCS) dan *Dendrite Cell Interval* (DCI).



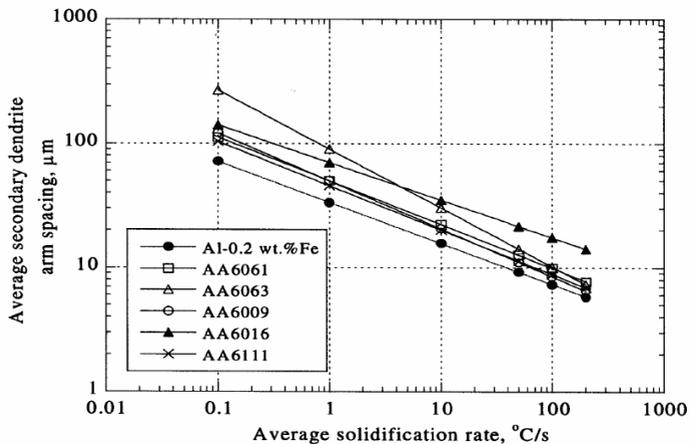
**Gambar 2.13** Ilustrasi DAS, DCS dan DCI  
(Spear & Gardner, 1963)



## 2.13 Kajian Penelitian Sebelumnya

### 2.13.1 Pengaruh Laju Pendinginan terhadap DAS dan Struktur Mikro

Dampak laju pendinginan terhadap pertumbuhan dendrit pada paduan aluminium dilakukan oleh Anyalebechi (2004). Dalam penelitian tersebut, diinvestigasi pengaruh elemen paduan dan laju solidifikasi terhadap *dendritic arm spacing* (DAS) beberapa paduan aluminium secara empiris. Beberapa paduan aluminium yang digunakan adalah Al-0,2% Fe; AA 6061; AA 6063; AA 6009; AA6016; dan AA 6111. Dari perhitungan yang dilakukan, dihasilkan grafik hubungan antara laju pendinginan dan rata-rata DAS yang terbentuk seperti yang terlihat pada Gambar 2.14 berikut.

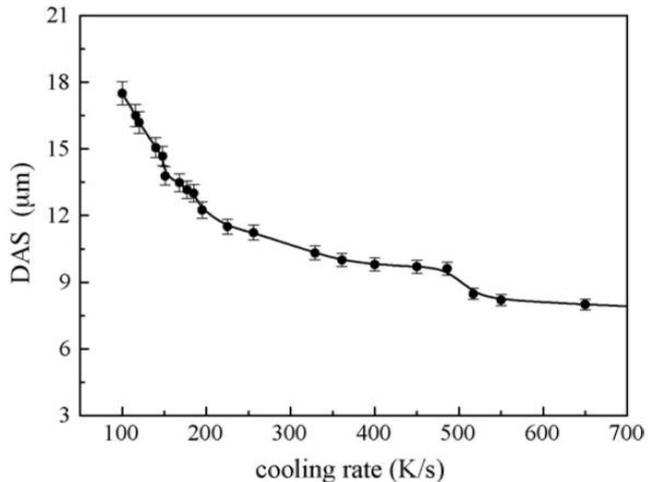


**Gambar 2.14** Pengaruh Laju Solidifikasi terhadap DAS Paduan Aluminium 6xxx (Anyalebechi, 2004)



Dari Gambar 2.15 dapat dilihat bahwa semakin besar laju solidifikasi yang diterima oleh paduan aluminium 6xxx maka semakin kecil jarak antar lengan dendrit nya.

Hasil yang tidak jauh berbeda juga didapatkan Zhang et al. (2007) pada penelitian sebelumnya yang memakai paduan aluminium A356 yang didinginkan dengan fasa transisi dan dengan pendinginan oleh air. Gambar 2.14 memperlihatkan grafik pengaruh laju pendinginan terhadap DAS rata-rata.

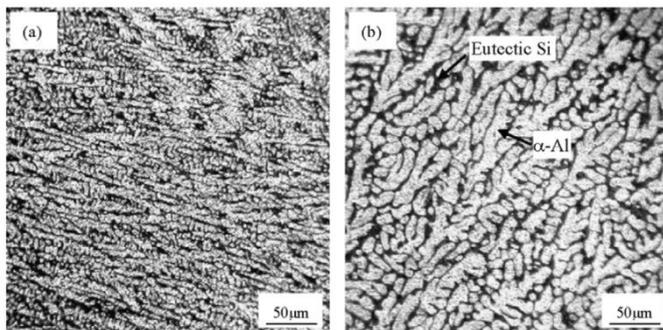


**Gambar 2.15** Pengaruh Laju Pendinginan terhadap DAS Paduan Aluminium A356 (Zhang et al., 2007)

Selain itu pengamatan terhadap struktur mikro paduan juga dipaparkan dalam penelitian. Gambar 2.16 menunjukkan perbedaan struktur mikro yang didapatkan dari pendinginan dengan



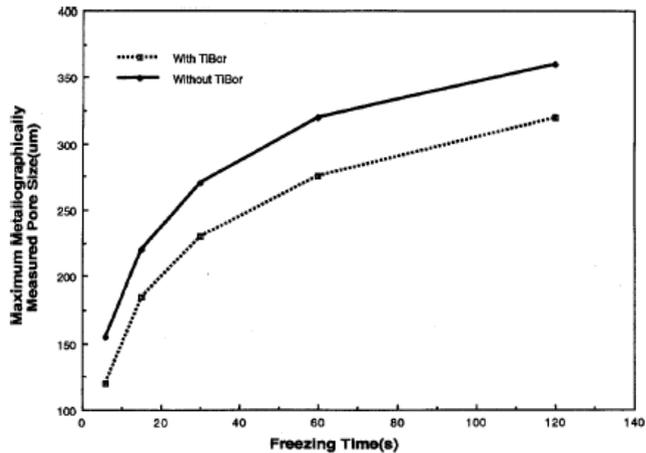
medium fasa transisi dan medium pendinginan air. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa struktur mikro dari pendinginan medium fasa transisi terlihat jauh lebih halus dibandingkan dengan medium pendinginan air. Hal ini dikarenakan laju pendinginan yang dialami oleh medium fasa transisi lebih besar dibandingkan dengan medium pendinginan air.



**Gambar 2.16** Struktur Mikro Aluminium A356 (a) medium fasa transisi (b) medium pendinginan air (Zhang et al., 2007)

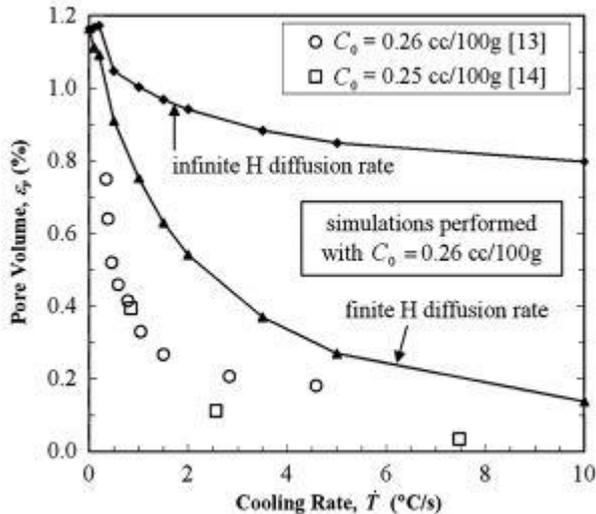
### 2.13.2 Pengaruh Laju Pendinginan terhadap Porositas

Gambar 2.17 menunjukkan hasil penelitian yang dilakukan Major (2002) yang meneliti mengenai kontrol porositas pad paduan aluminium A356. Dari gambar dapat dilihat hubungan antara waktu pendinginan dengan ukuran maksimum porositas yang terukur secara metalografi. Grafik tersebut memperlihatkan bahwa semakin cepat waktu pendinginan paduan aluminium tersebut, maka semakin kecil ukuran porositas yang terukur.



**Gambar 2.17** Pengaruh Waktu Pendinginan terhadap Ukuran Porositas Paduan Aluminium A356 (Major, 2002)

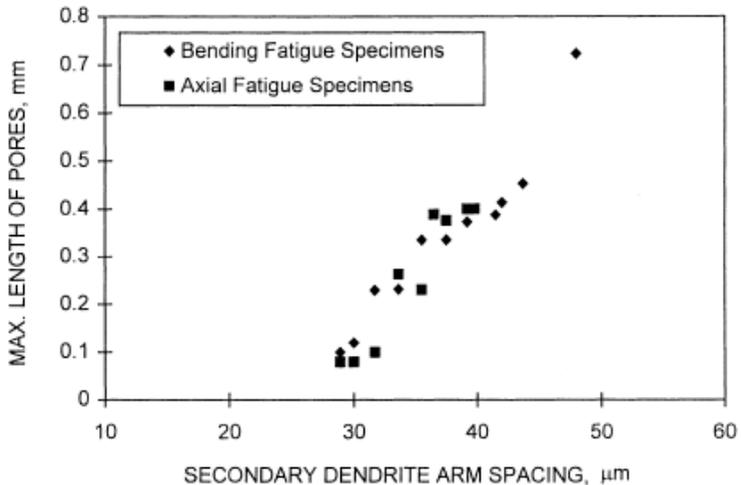
Hal yang relatif serupa juga disampaikan oleh Beckermann et al. (2007) dalam penelitian teoritisnya mengenai mekanisme pembentukan porositas saat proses solidifikasi. Gambar 2.18 memperlihatkan grafik hubungan laju pendinginan terhadap fraksi volume porositas pada paduan aluminium A356 yang didapat dari simulasi permodelan pembentukan porositas karena difusi hidrogen pada paduan aluminium. Grafik ini menunjukkan bahwa semakin cepat laju pendinginan paduan aluminium akan menghasilkan fraksi volume porositas yang semakin kecil.



**Gambar 2.18** Pengaruh Laju Pendinginan terhadap Fraksi Volume Porositas Paduan Aluminium A356 (Beckermann et al, 2007)

### 2.13.3 Pengaruh Ukuran DAS terhadap Porositas dan Kekuatan Tarik

Pengaruh ukuran *dendrite arm spacing* terhadap porositas dapat dilihat pada hasil penelitian yang dilakukan Zhang et al (2000) yang melakukan penelitian mengenai efek porositas terhadap *fatigue life* dengan menggunakan material paduan aluminium A356. Gambar 2.19 menunjukkan hasil plot hubungan antara DAS dengan maksimum ukuran porositas yang terlihat melalui radiografi.



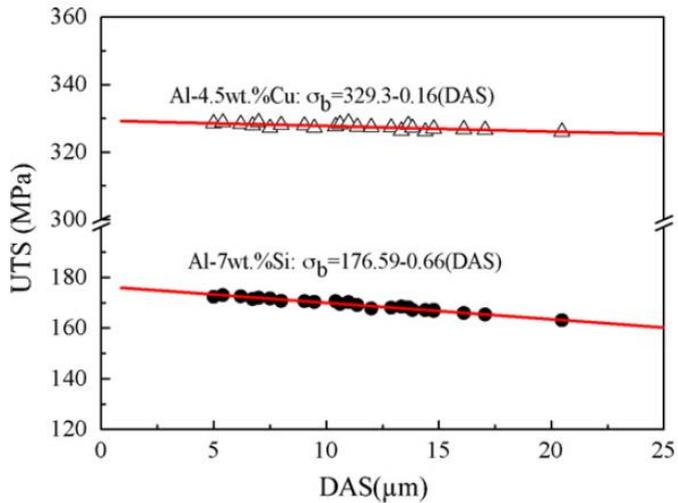
**Gambar 2.19** Pengaruh DAS terhadap Porositas (Zhang et al., 2000)

Dari gambar diatas dapat dilihat bahwa ukuran maksimum porositas meningkat seiring dengan meningkatnya ukuran DAS pada paduan aluminium. Selain itu dapat dilihat pula bahwa ukuran porositas tidak terlihat jelas ketika ukuran DAS dibawah 29  $\mu\text{m}$ .

Sedangkan pada Gambar 2.20 dapat dilihat grafik hubungan ukuran DAS terhadap kekuatan tarik paduan aluminium A356. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa kekuatan tarik yang dihasilkan dari paduan aluminium A356 semakin berkurang seiring dengan bertambahnya ukuran rata-rata DAS. Alasan utama hal tersebut dapat terjadi adalah distribusi *microporosity*, segregasi intergranular dan segregasi impuritas semakin jarang terjadi



ketika ukuran DAS berkurang (Zhang et al, 2008).

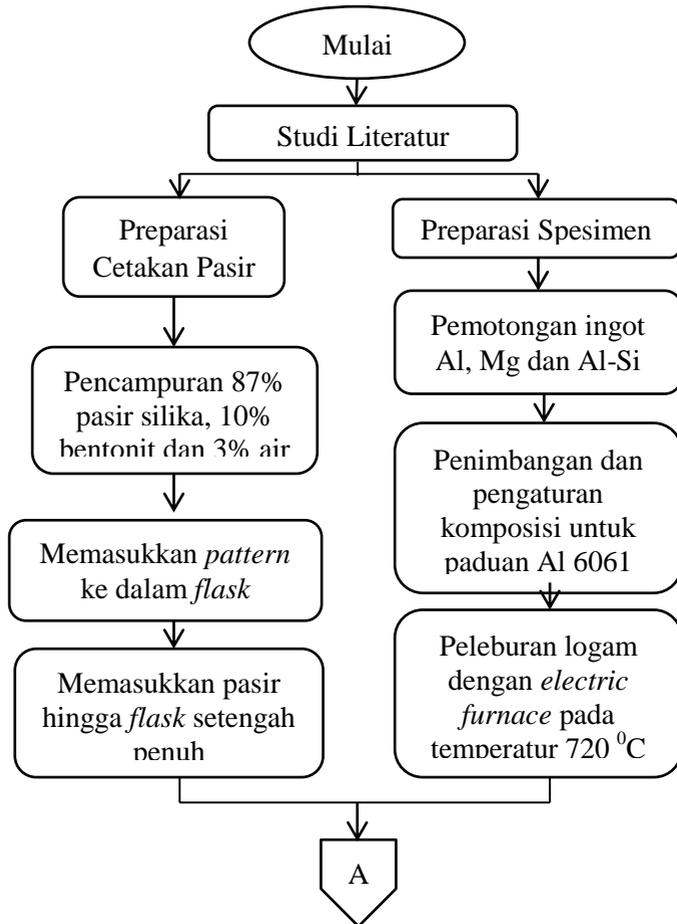


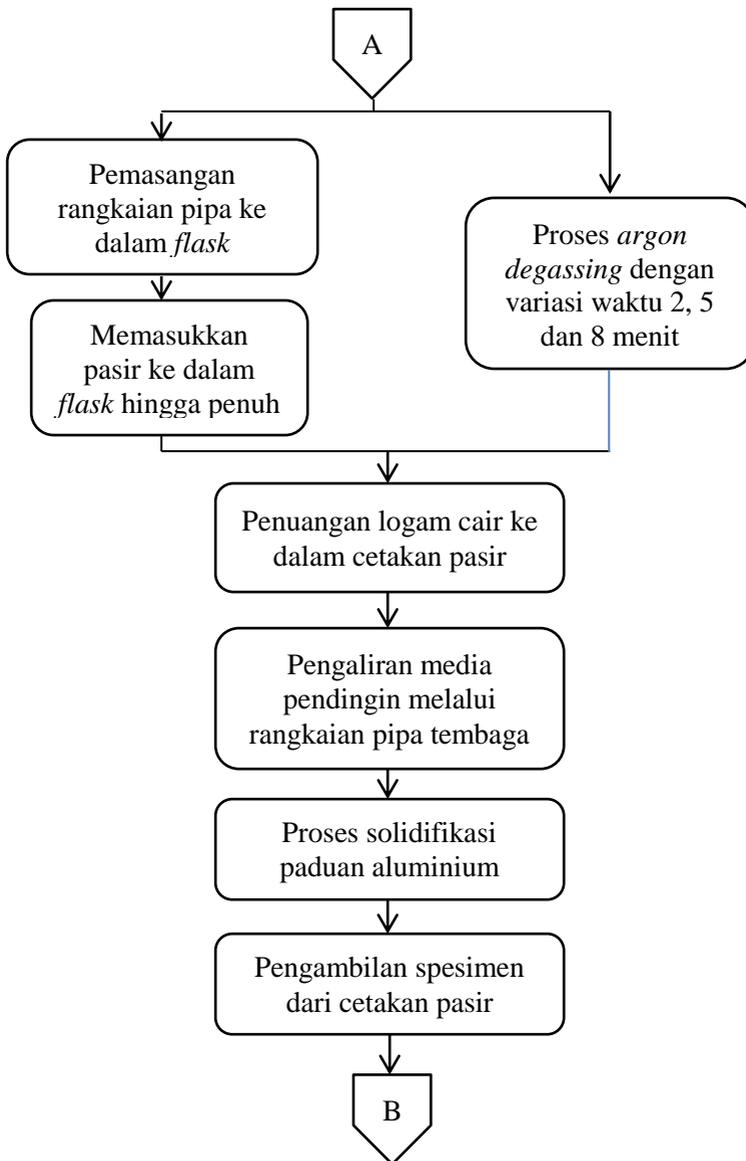
**Gambar 2.20** Pengaruh DAS terhadap Kekuatan Tarik Paduan Aluminium A356 (Zhang et al., 2008)

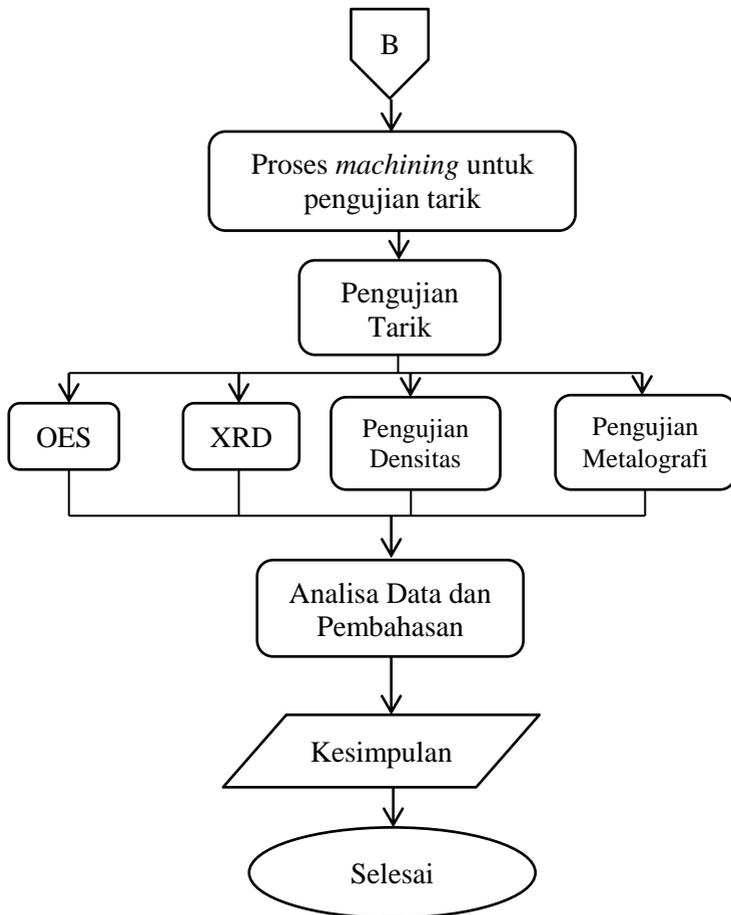
## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Diagram Alir Penelitian

Pelaksanaan penelitian ini dilakukan dengan beberapa tahap seperti ditunjukkan dalam Gambar 3.1 dibawah.







**Gambar 3.1** Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini dilakukan dalam beberapa tahap. Tahapan penelitian digambarkan pada diagram alir yang ditunjukkan pada Gambar 3.1. Pertama, dilakukan studi literatur terkait penelitian, lalu mempersiapkan bahan-bahan yaitu aluminium ingot, magnesium ingot dan paduan Al-Si. Selain itu juga disiapkan cetakan pasir



yang kemudian didinginkan dengan variabel media pendingin berupa air biasa, air dingin dan tanpa media pendingin. Setelah itu proses peleburan bahan menggunakan *electric furnace* pada temperatur  $720^{\circ}\text{C}$  lalu dilakukan proses *degassing* dengan variabel waktu 2 menit, 5 menit dan 8 menit. Kemudian logam cair dituangkan kedalam cetakan pasir. Setelah logam dingin spesimen diambil kemudian dilakukan proses machining. Kemudian dilakukan pengujian komposisi kimia dengan OES untuk menentukan komposisi kimia paduan dan dilakukan pengujian yang meliputi uji porositas, uji XRD, uji metalografi dan uji tarik. Selanjutnya dilakukan analisa data dan pembahasan terhadap data hasil uji. Proses terakhir adalah mengambil kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan.

### 3.2 Material yang Digunakan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Paduan Al-Si

Paduan yang digunakan pada penelitian ini merupakan paduan Aluminium silikon dengan persen jumlah berat sebesar 7,9% Si dalam bentuk ingot dari PT. Pinjaya Logam, Mojokerto. Ditunjukkan oleh Gambar 3.2.



**Gambar 3.2** Paduan Al-Si

2. Aluminium (Al) ingot  
Aluminium (Al) dalam bentuk batang dengan kadar >99% didapatkan dari PT. Inalum, Medan. Aluminium digunakan sebagai logam paduan. Ditunjukkan oleh Gambar 3.3.



**Gambar 3.3** Ingot Aluminium

3. Magnesium (Mg) ingot  
Magnesium (Mg). Magnesium yang digunakan dalam penelitian ini berupa



magnesium dalam bentuk ingot, dengan kadar >99% dari PT. Pinjaya Logam, Mojokerto. ditunjukkan pada Gambar 3.4.



**Gambar 3.4** Ingot Magnesium

4. Bahan Etsa

Bahan etsa yang digunakan dalam penelitian ini sesuai dengan *ASM Metals Handbook* Vol 9.

- a. 190 ml aquades
- b. 3 ml HCl
- c. 5 ml HNO<sub>3</sub>
- d. 2 ml HF

5. Gas Argon

Gas Argon yang digunakan dalam penelitian ini adalah gas argon yang terdapat di Laboratorium Teknik Material dan Metalurgi ITS. Gas Argon yang digunakan adalah 2 lt/menit dengan selang waktu sesuai dengan variasi waktu *degassing*.



### 3.3 Peralatan yang Digunakan

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. *Electric Furnace*

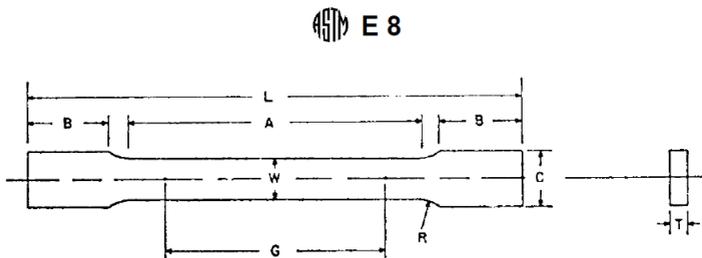
*Furnace* yang digunakan untuk meleburkan dan memadukan bahan merupakan *electric resistance furnace* yang ada di Laboratorium Teknik Material dan Metalurgi ITS.

2. *Crucible* Grafit

Digunakan sebagai wadah untuk proses peleburan. *Krusibel* yang digunakan memiliki ukuran A3 dan terbuat dari insulating brick tipe C-1 dibeli dari U.D Kampung Dukuh, Surabaya.

3. Pola Cetakan Komponen

Pola cetakan komponen digunakan untuk membuat cetakan hasil coran pada cetakan pasir. Pola cetakan hasil coran disesuaikan dengan standar pengujian yang akan dilakukan. Contoh pola cetakan yang akan dilakukan pada pengujian tarik ditunjukkan oleh. Gambar 3.5.



**Gambar 3.5** Dimensi Spesimen Uji Tarik  
(ASTM E8M)



Keterangan:

<i>Thickness, T</i>	=	19	mm
<i>Width, W</i>	=	12,5	mm
<i>Gauge Length, G</i>	=	50	mm
<i>Radius, R</i>	=	12,5	mm
<i>Total Length, L</i>	=	200	mm
<i>Reduced Length, A</i>	=	57	mm
<i>Grip Section, B</i>	=	50	mm
<i>Grip Width, C</i>	=	20	mm

4. Cetakan Pasir

Jenis cetakan pasir yang digunakan adalah cetakan terbuka atau *open mold* dengan ditambahkan pipa aluminium untuk mengalirkan media pendingin berupa air biasa dan air dingin.

5. Kikir

Kikir yang digunakan adalah milik Laboratorium Teknik Material dan Metalurgi ITS. Kikir digunakan untuk meratakan permukaan spesimen.

6. Gelas Ukur 250 ml

Alat ini digunakan untuk mengukur bahan saat pembuatan larutan etsa.

7. Timbangan Digital

Digunakan untuk mengukur massa bahan yang akan dilebur.

8. Kertas Abrasif

Digunakan untuk *grinding* spesimen pada uji metalografi. Digunakan kertas amplas *silicon carbide grade 600* hingga 2000.

9. Gergaji

Gergaji digunakan untuk memotong bahan lebur dan hasil coran. Gergaji yang digunakan adalah milik Laboratorium Teknik Material dan Metalurgi ITS.



10. Alat Uji OES  
Alat ini digunakan untuk mengetahui komposisi kimia benda hasil coran. Uji OES dilakukan di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya (PPNS).
11. Alat Uji XRD  
Alat ini digunakan untuk mengetahui struktur kristal serta fasa dari hasil coran. Uji XRD dilakukan di Laboratorium Karakterisasi Teknik Material dan Metalurgi ITS.
12. Alat Uji Tarik  
Mesin uji tarik yang digunakan adalah milik Laboratorium Metalurgi Teknik Material dan Metalurgi ITS. Digunakan untuk menguji kekuatan tarik dari spesimen paduan logam.
13. Mesin *Grinding & Polishing*  
Alat ini digunakan dalam proses grinding serta polishing spesimen dalam uji metalografi.
14. Mikroskop Optik (OLYMPUS BX51M-RF)  
Alat ini digunakan untuk mengetahui struktur mikro spesimen hasil coran.
15. Termometer *Infrared*  
Alat ini digunakan untuk mengukur temperatur saat pepaduan logam dalam *furnace* sedang berlangsung.
16. Termometer *Probe*  
Alat ini digunakan untuk mengukur temperatur media pendinginan air saat proses solidifikasi.



#### 17. Pipa Grafit

Alat ini digunakan untuk melakukan proses *degassing* menggunakan gas argon yang disemburkan kedalam logam cair.

#### 18. Pipa Tembaga

Pipa tembaga digunakan untuk mengalirkan media pendingin berupa air saat proses solidifikasi. Ukuran diameter pipa yang dipakai adalah  $\frac{3}{4}$  inchi.

#### 19. Pompa Air

Pompa air digunakan untuk mengalirkan air kedalam pipa aluminium saat proses solidifikasi. Pompa air yang digunakan adalah Halico AT-103.

#### 20. Pipa *Stainless Steel*

Alat ini digunakan untuk mengaduk logam cair dan mengangkat terak yang terbentuk saat proses peleburan.

### 3.4 Variabel Penelitian

Variabel bebas yang digunakan pada penelitian ini adalah variasi waktu *degassing* sebesar 2 menit, 5 menit dan 8 menit dan variasi laju pendinginan yang didapatkan dari media pendingin cetakan pasir berupa air biasa, air dingin dan tanpa media pendingin.

Sedangkan variabel yang dijaga tetap dalam penelitian ini adalah temperatur tuang logam cair sebesar  $720 \pm 5$  °C, gas argon yang dikeluarkan sebesar 2 lt/menit dan jumlah unsur paduan aluminium 6061 sesuai *ASM Specialty Handbook: Alloying*.

### 3.5 Prosedur Penelitian

#### 3.5.1 Prosedur Preparasi Bahan

Paduan Aluminium 6061 pada penelitian ini didapatkan dari mencampurkan *raw material*



berupa Al-Si, aluminium ingot dan magnesium ingot. Untuk mengetahui berapa banyak *raw material* yang dibutuhkan pada proses pengecoran paduan dilakukan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Melakukan perhitungan *allowance* untuk mendapatkan volume benda coran berbentuk balok. Dimensi spesimen meliputi:

$$\begin{aligned}\text{panjang (p)} &= 340 \text{ mm} \\ \text{lebar (l)} &= 19 \text{ mm} \\ \text{tinggi (t)} &= 20 \text{ mm}\end{aligned}$$

- a. *Shrinkage Allowance*

Nilai *shrinkage allowance* untuk material paduan aluminium sebesar 12 mm/m, maka dengan nilai tersebut dapat dicari panjang, lebar dan tinggi *allowance*-nya sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\text{panjang} &= 340 \text{ mm} \times 12/1000 \\ &= 4,08 \text{ mm} \\ \text{lebar} &= 19 \text{ mm} \times 12/1000 \\ &= 0,228 \text{ mm} \\ \text{tinggi} &= 20 \text{ mm} \times 12/1000 \\ &= 0,240 \text{ mm}\end{aligned}$$

Sehingga nilai dimensi benda coran setelah diberi *shrinkage allowance* adalah:

$$\begin{aligned}\text{panjang} &= 340 \text{ mm} + 4,08 \text{ mm} \\ &= 344,08 \text{ mm} \\ \text{lebar} &= 19 \text{ mm} + 0,228 \text{ mm} \\ &= 19,228 \text{ mm} \\ \text{tinggi} &= 20 \text{ mm} + 0,240 \text{ mm} \\ &= 20,240 \text{ mm}\end{aligned}$$

- b. *Machining Allowance*

Nilai *machining allowance* untuk material *non-ferrous* di permukaan



sebesar 1,5 mm untuk satu sisi, jika saat machining dilakukan di dua sisi berbeda, maka nilai *allowance*-nya dikali 2. Dengan nilai tersebut dapat dicari panjang, lebar dan tinggi *allowance*-nya sebagai berikut:

$$\text{panjang} = 344,08 + 2(1,5 \text{ mm})$$

$$= 347,08 \text{ mm}$$

$$\text{lebar} = 19,228 + 2(1,5 \text{ mm})$$

$$= 22,228 \times 3$$

$$= 66,684 \text{ mm}$$

$$\text{tinggi} = 20,240 + 2(1,5 \text{ mm})$$

$$= 23,240 \text{ mm}$$

Khusus untuk dimensi lebar spesimen, ukuran dikalikan dengan 3 (tiga) karena akan dibuat 3 spesimen uji tarik dalam satu kali proses pengecoran.

c. *Draft Allowance*

Penelitian dilakukan dengan menggunakan *pattern* yang terbuat dari kayu, maka nilai sudut *draft*-nya adalah  $1,5^\circ$ . Sehingga dapat dihitung panjang dan lebar *allowance*-nya sebagai berikut:



$$\tan (1,5^\circ) = \frac{y}{x}$$

$$\tan (1,5^\circ) = \frac{y}{23,240}$$



$$\begin{aligned}y &= 0,61 \text{ mm} \\ \text{Sehingga dimensi benda coran} \\ \text{menjadi:} \\ \text{panjang} &= 347,08 + 2(0,61) \\ &= 348,3 \text{ mm} \\ \text{lebar} &= 66,684 + 2(0,61) \\ &= 67,904 \text{ mm} \\ \text{tinggi} &= 23,240 \text{ mm}\end{aligned}$$

2. Melakukan perhitungan *material balance* untuk mengetahui massa masing-masing *raw material* yang dibutuhkan.

$$\begin{aligned}\text{Volume benda coran} &= p \times l \times t \\ &= 348,3 \times 67,904 \times 23,240 \\ &= 549648,385 \text{ mm}^3 \\ &= 549,6484 \text{ cm}^3\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Massa benda coran} &= \text{volume} \times \text{densitas} \\ \text{paduan} \\ &= 549,6484 \text{ cm}^3 \times 2,7 \text{ g/cm}^3 \\ &= 1484,05 \text{ g}\end{aligned}$$

Perhitungan *material balance* untuk setiap *raw material* dilakukan dengan persamaan 3.1. Sedangkan komposisi paduan yaitu 0,4-0,8 Si dan 0,8-1,2 Mg (ASM *Specialty Handbook*, 2001).

$$\frac{\% \text{ Target Unsur}}{\% \text{ Rasio Kadar Unsur pada Bahan}} \times \text{Massa Total} \quad (3-1)$$

Setelah dilakukan perhitungan, didapatkan massa *raw material* yang dibutuhkan adalah sebagai berikut:

$$\text{Al-Si} = 150,2835 \text{ g}$$

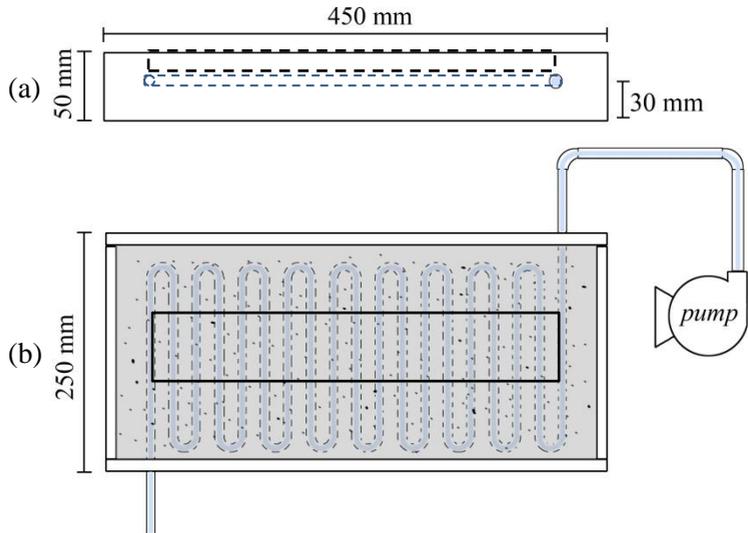


---

Mg	= 21,2007	g
Al	= 1312,5658	g

### 3.5.2 Prosedur Preparasi Cetakan

Cetakan yang digunakan dalam penelitian terbuat dari pasir silika dan bentonite sebagai perekat. Pertama menyiapkan pasir silika, bentonite, dan air. Selanjutnya menimbang pasir silika dan bentonite dengan komposisi 87% pasir silika, 3% air dan 10% bentonite. Kemudian memasukkan pasir silika dan bentonite ke dalam wadah dan mengaduknya secara merata dengan menambahkan air secara bertahap. Lalu menyiapkan pola benda coran yang kemudian dimasukkan kedalam *flask*. Kemudian memasukkan dan memadatkan pasir hingga menutupi pola benda coran. Pipa tembaga kemudian dimasukkan dengan kedalaman  $\pm 3$  cm dari permukaan atas *flask* lalu ditambahkan pasir hingga flask penuh dan padat. Ilustrasi desain cetakan pasir seperti terlihat pada Gambar 3.6 dibawah.



**Gambar 3.6** Ilustrasi Media Pendingin pada Cetakan Pasir (a) Tampak Depan dan (b) Tampak Atas

Pada gambar 3.6 dapat dilihat ilustrasi metode pendinginan pada cetakan pasir yang akan dipakai. Cetakan berupa cetakan *open mold* dengan dimensi 450 mm x 250 mm x 50 mm. Sedangkan rangkaian pipa tembaga dibenamkan kedalam cetakan pasir dengan kedalaman dari permukaan atas cetakan sebesar 30 mm. Rangkaian pipa tembaga dibuat mengular dan kemudian disambungkan dengan pompa air yang nantinya akan memompa media pendingin kedalam pipa tembaga sehingga media pendingin dapat mempercepat laju pendinginan pada logam cair yang dituang kedalam cetakan pasir.



### 3.5.3 Prosedur Pengecoran

Setelah proses preparasi bahan dan preparasi cetakan selesai selanjutnya dilakukan proses pengecoran. Proses pengecoran dimulai dengan memasukkan Al-Si dan Al ingot kedalam krusibel kemudian dimasukkan kedalam *electric furnace* yang kemudian dipanaskan hingga  $\pm 700$  °C. Setelah itu dimasukkan Mg ingot kedalam logam cair dengan bantuan pengaduk berbahan *stainless steel*. Proses selanjutnya adalah proses *degassing* dengan menggunakan gas argon yang disalurkan menggunakan pipa grafit selama 2 menit, 5 menit dan 8 menit dengan volume 2 lt/menit. Setelah proses *degassing* dilakukan, temperatur dipastikan stabil di 720 °C kemudian krusibel diangkat lalu logam cair dituangkan kedalam cetakan pasir yang sudah dialiri media pendingin berupa air biasa dan air dingin melalui pipa tembaga yang disambungkan dengan pompa. Selanjutnya adalah proses solidifikasi logam hingga solid sempurna kemudian logam dikeluarkan dari cetakan.

## 3.6 Proses Pengujian

Pada penelitian ini dilakukan lima pengujian. Pengujian komposisi dengan OES, pengujian metalografi untuk melihat struktur mikro, uji XRD untuk mengetahui fasa yang terbentuk, uji tarik untuk mengetahui kekuatan tarik spesimen dan uji porositas untuk mengetahui persen porositas yang terbentuk.

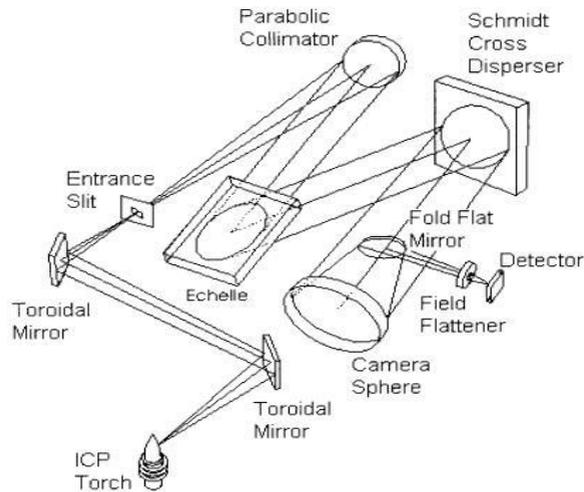
### 3.6.1 Pengujian Komposisi

Pengujian komposisi dilakukan untuk mengetahui unsur-unsur yang terkandung dalam



paduan aluminium hasil coran beserta banyaknya unsur yang terkandung. Pengujian ini dilakukan untuk memastikan bahwa paduan aluminium yang dihasilkan sudah sesuai dengan standar yang ada. Pengujian komposisi ini dilakukan dengan metode *Optical Emission Spectroscopy* (OES).

Pengujian *Optical Emission Spectroscopy* atau OES adalah pengujian dengan menembakkan elektron pada bidang datar spesimen sehingga memantulkan gelombang cahaya yang dapat ditangkap oleh *receiver* dan sensor yang kemudian dicocokkan dengan database yang ada. OES dapat mengetahui berbagai unsur tergantung dari database yang tersedia. Gambar 3.7 menjelaskan gambaran prinsip kerja *Optical Emission Spectroscopy* (OES). Pengujian OES dilakukan di PPNS dengan spesifikasi alat uji merk *OES Foundry Master Pro 44P0070 series*.



**Gambar 3.7** Prinsip Pengujian OES

Prosedur pengujian komposisi ini dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Spesimen yang telah diuji tarik dipotong pada bagian tengah dengan panjang kurang lebih 2 cm. Sehingga dimensi keseluruhan spesimen uji OES ini adalah 2 cm x 1,9 cm x 1,25 cm.
2. Spesimen kemudian dimasukkan kedalam alat uji OES dan elektron ditembakkan ke bidang datar spesimen.
3. Hasil yang diterima oleh *receiver* kemudian di proses oleh komputer dan dicetak kedalam bentuk laporan hasil uji komposisi spesimen.

Pengambilan spesimen dengan cara ini dipilih selain dianggap telah mewakili keseluruhan bagian paduan juga untuk



memastikan bahwa *fracture* pada pengujian tarik bukan diakibatkan oleh paduan yang tidak homogen.



**Gambar 3.8** Bagian yang Diambil untuk Spesimen Uji Komposisi

### 3.6.2 Pengujian Metalografi

Pengujian metalografi dilakukan untuk melihat gambaran struktur mikro paduan yang dihasilkan. Dari struktur mikro ini dapat dilihat fasa-fasa dan porositas yang terbentuk pada paduan. Selain itu dapat pula dihitung ukuran *Dendrite Arm Spacing* (DAS) sehingga dapat ditentukan pengaruh laju pendinginan terhadap ukuran DAS.

Proses pengujian metalografi ini dapat dilihat dalam langkah-langkah sebagai berikut:

1. Spesimen metalografi diambil dari bagian ujung salah satu spesimen uji tarik dengan panjang kurang lebih 2 cm.
2. Permukaan spesimen diratakan dengan menggunakan kikir dan di haluskan menggunakan kertas abrasif secara bertahap dari *grade* 240 hingga 2000.
3. Spesimen di-*polishing* dengan menggunakan autosol.
4. Spesimen di etsa dengan cara *immerse* selama 20-30 detik.
5. Spesimen kemudian diamati dengan menggunakan mikroskop dengan perbesaran 50 kali dan 100 kali.



Struktur atau gambar logam yang terlihat melalui pengamatan dengan mikroskop disebut struktur mikro. Pada gambar ini terlihat daerah lingkup ukuran mikro struktur logam yang umumnya diamati dengan mikroskop. Gambar 3.9 menunjukkan alat yang digunakan dalam pengujian yaitu *Metallurgical Microscope* OLYMPUS BX51M-RF sedangkan larutan etsa yang digunakan adalah larutan etsa yang sesuai dengan ASM Metal Handbook Vol 9 untuk Al-Mg-Si.

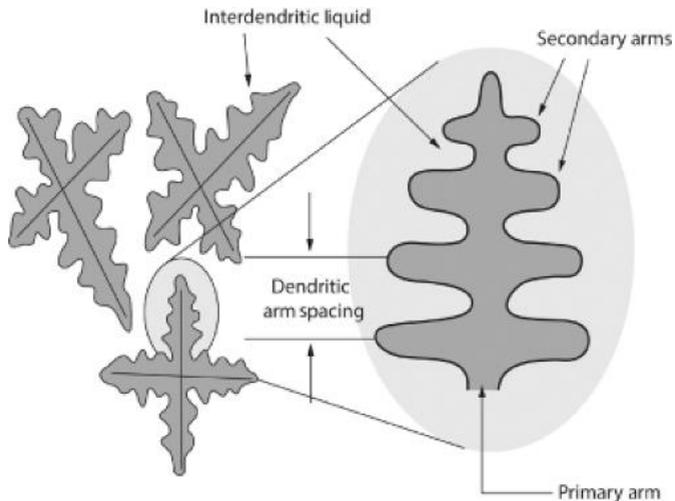


**Gambar 3.9** Mikroskop Optik OLYMPUS BX51M-RF

Pada pengukuran DAS, gambar struktur mikro digunakan untuk mendapatkan data ukuran DAS yang kemudian hasil ini dirata-rata menurut perbedaan laju pendinginan. Gambar 3.10 menunjukkan mekanisme perhitungan ukuran DAS dari gambar struktur mikro yang

didapatkan. Langkah-langkah perhitungan ukuran DAS sebagai berikut:

1. Pemberian garis bantu untuk menyederhanakan bentuk dendrit pada gambar hasil struktur mikro.
2. Pengukuran jarak antara lengan dendrit dengan menggunakan mistar.
3. Jarak yang didapat kemudian diubah kedalam ukuran sebenarnya dengan memperhatikan skala gambar.



**Gambar 3.10** Mekanisme Pengukuran Dendrite Arm Spacing (DAS) pada dendrit yang Terbentuk pada Struktur Mikro

### 3.6.3 Pengujian Tarik

Pengujian tarik dilakukan untuk menguji kekuatan suatu bahan/material dengan cara memberikan beban gaya yang sesumbu. Pengujian ini dilakukan untuk mendapatkan



nilai kekuatan tarik, persen elongasi dan nilai modulus elastisitas paduan sehingga dapat ditentukan pengaruh variabel waktu *degassing* dan laju pendinginan terhadap nilai kekuatan tarik. Selain itu, uji ini juga dilakukan untuk mengukur ketahanan suatu material terhadap gaya statis yang diberikan secara lambat. Pengujian dilakukan sesuai standar JIS Z 2201 No.5 (a) di Lab. Metalurgi Jurusan Teknik Material dan Metalurgi ITS. Langkah-langkah pengujian tarik dilakukan sebagai berikut:

1. Spesimen disiapkan sesuai dengan standar uji yang digunakan.
2. Memasangkan spesimen pada alat pengujian dan pastikan spesimen terkunci pada grip.
3. Memberikan beban secara terus menerus sampai spesimen patah atau *fracture*.
4. Grafik uji tarik kemudian akan dihasilkan setelah pengujian selesai dilakukan.

Gambar 3.11 memperlihatkan alat uji tarik yang digunakan dalam proses pengujian. Alat uji tarik yang digunakan adalah GOTECH GT-7001-LC50.



**Gambar 3.11** Alat Uji Tarik GOTECH GT-7001-LC50

### 3.6.4 Pengujian XRD

Pengujian XRD dilakukan untuk mendapatkan data berupa fasa yang terbentuk pada paduan hasil pengecoran. Fasa yang terbentuk ini kemudian dianalisa untuk mengetahui pengaruh waktu *degassing* dan laju pendinginan terhadap fasa yang terbentuk.

Prinsip kerja pada pengujian sinar X adalah ketika suatu material dikenai sinar X, maka intensitas sinar yang ditransmisikan lebih rendah dari intensitas sinar datang. Hal ini disebabkan adanya penyerapan oleh material dan juga penghamburan oleh atom-atom dalam material tersebut. Berkas sinar X yang dihamburkan tersebut ada yang saling menghilangkan karena fasanya berbeda dan ada juga yang saling menguatkan karena fasanya



sama. Berkas sinar X yang saling menguatkan itulah yang disebut sebagai berkas difraksi. Gambar 3.12 menunjukkan alat yang digunakan untuk pengujian XRD. Pengujian XRD pada penelitian ini dilakukan di Laboratorium Karakterisasi Material Jurusan Teknik Material dan Metalurgi ITS. Pengujian dilakukan dengan mesin PAN Analytical XRD. Sampel yang digunakan untuk pengujian XRD ini harus memiliki ketinggian tidak lebih dari 4 mm. Hasil XRD ini kemudian dianalisis dengan menggunakan *software* Match! 3 sehingga didapatkan data fasa yang terbentuk sesuai data referensi berupa ICDD card.



**Gambar 3.12** Alat Uji XRD PANalytical Xpert Pro



### 3.6.5 Pengujian Densitas

Pengujian densitas dilakukan pada penelitian ini untuk mengetahui densitas paduan yang dihasilkan dan kemudian dibandingkan dengan nilai densitas yang ada pada teori. Dari perbandingan ini dapat dihitung tingkat porositas yang terdapat dalam paduan aluminium hasil pengecoran.

Pengujian porositas dilakukan dengan menggunakan metode Archimedes dengan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Spesimen dipotong dengan ukuran 2 cm x 2 cm x 2 cm.
2. Massa spesimen di udara ditimbang dengan menggunakan timbangan digital.
3. Kemudian spesimen diikat dengan tali dan dimasukkan kedalam gelas kimia yang telah diisi *aquades* sebanyak 150 ml dan diletakkan diatas timbangan digital.
4. Selisih massa gelas kimia sebelum dan setelah dimasukkan spesimen kemudian diukur seperti terlihat pada Gambar 3.13.
5. Selisih massa ini kemudian dikalikan dengan densitas *aquades* yang dianggap 1 gr/cm<sup>3</sup> dan didapatkan volume spesimen terukur.
6. Densitas spesimen kemudian dihitung dari massa spesimen dibagi dengan volume spesimen.
7. Tingkat porositas kemudian dihitung dengan menggunakan persamaan berikut sesuai dengan standar ASTM B311.



$$\text{Tingkat Porositas (\%)} = \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho_{th}}\right) \times 100 \quad (3-2)$$

Keterangan:

$\rho_s$  : Densitas sebenarnya

$\rho_{th}$  : Densitas teoritis



**Gambar 3.13** Pengukuran Volume Spesimen pada Pengujian Densitas

### 3.7 Rancangan Penelitian

Untuk memperoleh data yang sistematis dari penelitian ini, maka dibuat rancangan penelitian dan rancangan jadwal penelitian seperti pada Tabel 3.1 dibawah.



**Tabel 3.1** Rancangan Penelitian

Variabel		Nama Spesimen	Metode Pengujian				
Waktu Degassing (menit)	Laju Pendinginan (°C/menit)		Uji OES	Uji XRD	Uji Metalografi	Uji Tarik	Uji Porositas
2	13	Dt2/CR13		√	√	√	√
2	20	Dt2/CR20		√	√	√	√
2	26	Dt2/CR26		√	√	√	√
5	13	Dt5/CR13		√	√	√	√
5	20	Dt5/CR20		√	√	√	√
5	26	Dt5/CR26	√	√	√	√	√
8	13	Dt8/CR13		√	√	√	√
8	20	Dt8/CR20		√	√	√	√
8	26	Dt8/CR26		√	√	√	√

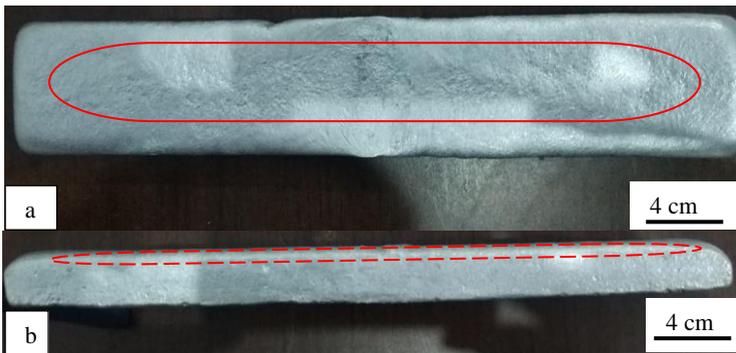


*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Pengamatan Hasil Coran Paduan Aluminium 6061

Proses peleburan yang dilakukan untuk membentuk paduan logam Al 6061 menghasilkan produk berupa balok-balok paduan aluminium sesuai dengan dimensi yang dirancang seperti yang terlihat pada Gambar 4.1.



**Gambar 4.1** Paduan Aluminium Hasil Coran  
(a) Tampak Atas; (b) Tampak Depan

Gambar 4.1 menunjukkan spesimen hasil coran Al 6061 tampak atas dan tampak depan. Permukaan hasil coran paduan bersifat kasar karena ukuran butir pasir cetakan yang digunakan dan bersentuhan dengan permukaan coran masih kasar. Sedangkan pada bidang permukaan hasil coran yang pada gambar ditunjukkan dengan lingkaran merah terdapat sedikit cekungan akibat dari proses penyusutan atau *shrinkage* yang terjadi. Terjadinya penyusutan ini merupakan hal yang alami dan hampir tidak dapat dihindari pada proses pengecoran konvensional menggunakan cetakan pasir. Lebih jauh, pada pengamatan awal porositas dan cacat pada hasil coran paduan, tidak didapatkan porositas dan cacat coran yang terbentuk pada permukaan hasil coran yang terlihat



pada pengamatan visual oleh mata manusia. Tabel 4.1 memperlihatkan hasil pengamatan ukuran hasil coran untuk memastikan tingkat keseragaman benda cor yang dihasilkan dari masing-masing proses pengecoran.

**Tabel 4.1** Hasil Pengukuran Dimensi dan Berat Hasil Coran

Spesimen	Panjang (mm)	Lebar (mm)	Tinggi (mm)	Berat (gr)
Dt2/CR13	342	65	25	1319
Dt5/CR13	343	64.2	25.7	1392
Dt8/CR13	341	65.3	24.9	1357
Dt2/CR20	343	64.4	25.1	1382
Dt5/CR20	343	66	24.7	1391
Dt8/CR20	342	65.9	25.4	1320
Dt2/CR26	343	64.4	27	1408
Dt5/CR26	342	65.9	24.7	1373
Dt8/CR26	341	65.5	22.5	1242
<b>Rata-rata</b>	<b>342.22</b>	<b>65.18</b>	<b>25.00</b>	<b>1353.78</b>

Dari Tabel 4.1 dapat dilihat bahwa dari data panjang spesimen tidak mengalami perbedaan yang signifikan yaitu  $342 \pm 1$  mm dengan rata-rata panjang 342.22 mm. Begitu pula dengan lebar spesimen yaitu  $65 \pm 1$  mm dengan rata-rata lebar 65.18 mm. Hal yang sedikit berbeda terjadi pada tinggi spesimen yang memiliki perbedaan ketinggian mencapai  $25 \pm 2.5$  mm dengan rata-rata tinggi 25 mm.



**Gambar 4.2** Paduan Aluminium Hasil Coran setelah di-machining (a) Tampak Atas; (b) Tampak Depan

Gambar 4.2 memperlihatkan balok-balok paduan hasil coran yang telah dilakukan proses *machining*. Proses ini bertujuan untuk meratakan sebagian besar permukaan dan membentuk dimensi spesimen uji tarik sesuai dengan standar ASTM E-8M dengan *grip* yang dibuat lebih panjang untuk menyesuaikan panjang minimum agar dapat dilakukan pengujian tarik di Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS. Hasil proses *machining* seperti yang terlihat pada Gambar 4.2. Pada pengamatan visual penampang hasil potongan spesimen ini, tidak didapati porositas dan cacat coran yang terlihat dengan jelas. Hal ini merupakan indikasi yang baik untuk spesimen dilakukan pengujian kekuatan tarik.

#### 4.2 Hasil Pengujian Kekuatan Tarik Paduan Aluminium 6061

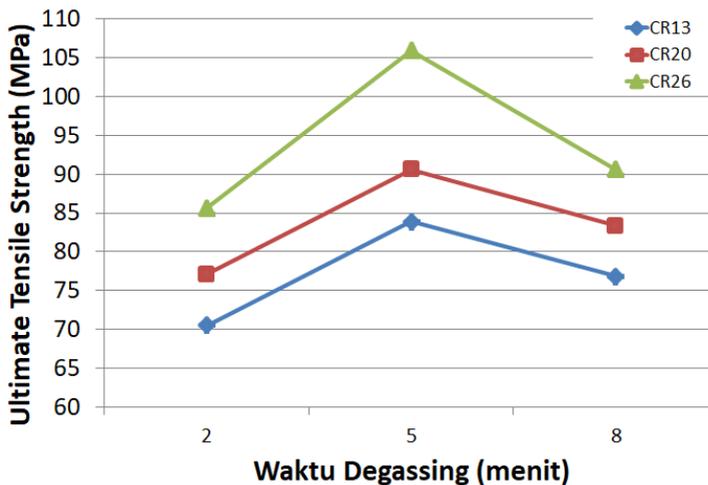
Bentuk spesimen yang digunakan dalam pengujian tarik ini didasarkan pada standar ASTM E-8M dengan masing-masing paduan menggunakan tiga spesimen untuk



memastikan hasil pengujian tarik yang didapatkan. Tabel 4.2 menunjukkan hasil pengujian tarik berupa nilai UTS, persen elongasi dan nilai modulus elastisitas masing-masing paduan aluminium hasil coran.

**Tabel 4.2** Data Hasil Pengujian Tarik Paduan Aluminium

Spesimen	UTS (MPa)	Elongasi (%)	Modulus Elastisitas (GPa)
Dt2/CR13	70,53	2,63	1,0526
Dt5/CR13	83,87	1,75	1,3334
Dt8/CR13	76,87	2,34	1,1684
Dt2/CR20	77,1	2,75	1,1866
Dt5/CR20	90,6	2,6	1,5144
Dt8/CR20	83,33	2,34	1,2730
Dt2/CR26	85,67	2,34	1,0726
Dt5/CR26	105,9	2,16	1,5885
Dt8/CR26	90,6	2,28	0,9874



**Gambar 4.3** Nilai Ultimate Tensile Strength Paduan Aluminium Hasil Coran



Gambar 4.3 memperlihatkan hasil rata-rata nilai kekuatan tarik pada masing-masing paduan yang diinterpretasikan kedalam sebuah grafik. Dari gambar 4.3 dapat dilihat bahwa nilai kekuatan tarik paling kecil adalah 70,53 MPa yang didapat dari spesimen dengan kode penamaan Dt2/CR13 yaitu hasil coran yang mendapatkan waktu *degassing* selama 2 menit dan laju pendinginan sebesar 13 °C/menit. Sedangkan nilai kekuatan tarik terbesar 105,9 MPa yang didapat dari spesimen dengan kode penamaan Dt5/CR26 yaitu hasil coran yang mendapatkan waktu *degassing* selama 5 menit dan laju pendinginan paling besar yaitu 26 °C/menit. Dengan penambahan waktu *degassing* dari 2 menit menjadi 5 menit, kekuatan tarik yang didapatkan dari paduan terlihat meningkat. Sedangkan pada penambahan waktu *degassing* dari 5 menit menjadi 8 menit, nilai kekuatan tarik secara umum terlihat menurun namun masih lebih tinggi apabila dibandingkan dengan paduan yang mendapatkan waktu *degassing* selama 2 menit.

**Tabel 4.3** Kenaikan UTS berdasarkan Laju Pendinginan

Spesimen	UTS (MPa)	Kenaikan (%)
Dt2/CR13	70,53	-
Dt2/CR20	77,1	9,32
Dt2/CR26	85,67	21,47
Dt5/CR13	83,87	-
Dt5/CR20	90,6	8,02
Dt5/CR26	105,9	26,27
Dt8/CR13	76,87	-
Dt8/CR20	83,33	8,4
Dt8/CR26	90,6	17,86

Tabel 4.3 menunjukkan bahwa laju pendinginan yang paling optimal dari ketiga variasi yang diberikan adalah laju pendinginan sebesar 26 °C/menit dengan total kenaikan nilai



kekuatan tarik pada masing-masing waktu *degassing* sebesar 21,47%; 26,27% dan 17,86%. Kenaikan nilai kekuatan tarik ini memperlihatkan bahwa laju pendinginan sangatlah berpengaruh terhadap kekuatan tarik paduan aluminium. Kenaikan nilai ini tidak lepas dari struktur mikro dan tingkat porositas yang akan dibahas pada subbab selanjutnya.

#### 4.3 Hasil Pengujian Komposisi Kimia Paduan Aluminium 6061

Setelah proses pengecoran selesai dilakukan, maka didapatkan hasil coran paduan yang diambil salah satu sebagai sampel pengujian komposisi. Hasil pengujian komposisi kimia yang dilakukan pada sampel paduan dapat dilihat pada Tabel 4.4 berikut.

**Tabel 4.4** Komposisi Kimia Paduan Aluminium 6061 Hasil Coran

Unsur	Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Al
Kadar (%)	0,457	1,18	0,099	0,20	0,077	<i>Balanced</i>

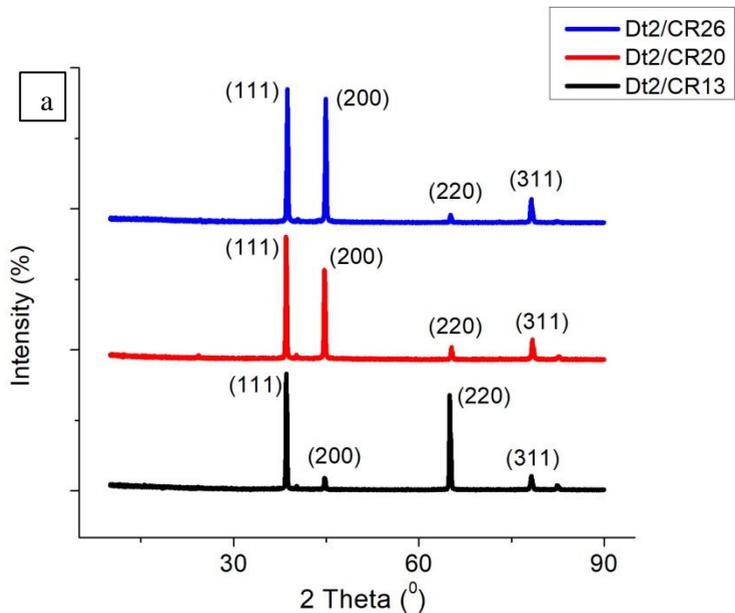
Dari Tabel 4.4 dapat dilihat bahwa kadar unsur magnesium yang terkandung dalam paduan sesuai dengan standar yaitu dalam rentang 0,8 – 1,2%. Sedangkan kadar unsur silikon yang terkandung dalam paduan adalah 0,457% dimana angka ini relatif kecil meskipun masih sesuai dengan standar komposisi yang ada. Sedangkan unsur lain seperti tembaga, besi dan mangan masih dalam rentang standar komposisi. Rendahnya kadar unsur silikon ini dikarenakan adanya oksidasi yang terjadi pada unsur silikon menjadi terak berupa  $\text{SiO}_2$ . Sedangkan disisi lain, unsur magnesium memiliki kadar yang cukup tinggi karena ingot magnesium yang digunakan ditambahkan sekitar 10% dari perhitungan *mass balance* sehingga ketika magnesium ini teroksidasi menjadi  $\text{MgO}$ , kadarnya masih dalam rentang standar

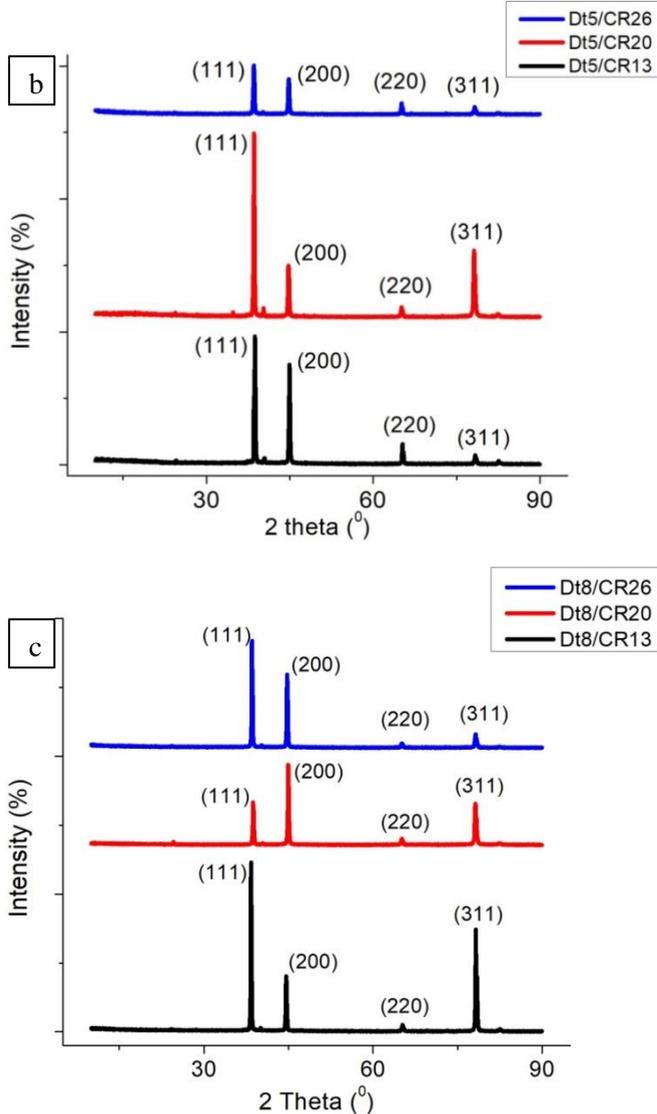


komposisi. Terak lain yang terbentuk adalah produk oksidasi aluminium yang merupakan unsur utama dalam paduan Aluminium 6061 berupa aluminium oksida ( $Al_2O_3$ ). Terak ini kemudian dihilangkan secara manual menggunakan pengaduk berbahan *stainless steel*.

#### 4.4 Hasil Pengujian XRD Paduan Aluminium 6061

Pengujian X-Ray Diffraction dilakukan di Laboratorium Karakterisasi Material Departemen Teknik Material FTI-ITS. Pengujian ini bertujuan untuk mengidentifikasi transformasi fasa yang terbentuk pada paduan aluminium 6061. Gambar 4.4 memperlihatkan pola XRD dari masing-masing paduan aluminium hasil coran. Hasil pengujian XRD ini kemudian dianalisis dengan menggunakan *software* Match! 3 dan dibandingkan dengan data ICDD *card* fasa yang terdeteksi untuk memastikan *peak* yang terbentuk.





**Gambar 4.4** Hasil XRD Paduan Aluminium Hasil Coran dengan waktu degassing (a) 2 menit; (b) 5 menit; (c) 8 menit

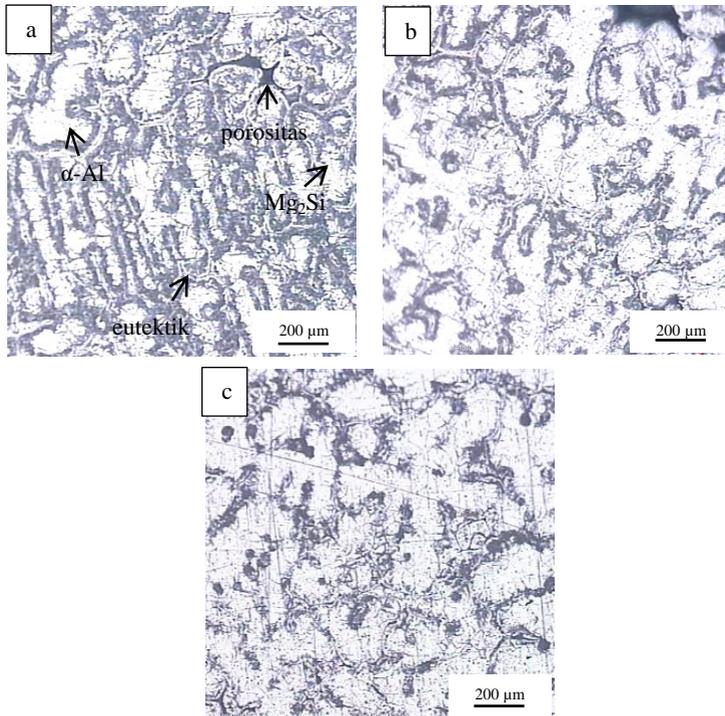


Gambar 4.4 menunjukkan hasil XRD dari paduan aluminium yang dipisahkan berdasarkan waktu *degassing* masing-masing paduan dengan perbedaan laju pendinginan masing-masing 13 °C/menit, 20 °C/menit dan 26 °C/menit. Secara umum, *peak* yang muncul pada pola XRD logam paduan memperlihatkan *peak* yang muncul pada posisi 2 $\theta$  38° dengan bidang (1 1 1), posisi 2 $\theta$  44° dengan bidang (2 0 0), posisi 2 $\theta$  64° dengan bidang (2 2 0), posisi 2 $\theta$  78° dengan bidang (3 1 1) dengan nama fasa  $\alpha$  Aluminium. Fasa  $\alpha$  aluminium yang muncul ini memiliki struktur kristal *cubic* sesuai dengan ICDD *card* nomor PDF #00-004-0787. Sedangkan fasa Mg<sub>2</sub>Si yang terbentuk pada paduan aluminium menurut diagram fasa Al-Mg-Si tidak terlihat pada pola hasil XRD diatas dikarenakan fasa yang terbentuk ini terlalu kecil sehingga *peak* yang muncul sangat kecil dan tidak dapat dipastikan bahwa *peak* tersebut merupakan *peak* fasa Mg<sub>2</sub>Si atau hanya *background* dari pengujian XRD. Namun fasa Mg<sub>2</sub>Si terdeteksi melalui data *peak list* hasil pengujian paduan Dt5/CR13 dengan posisi 2 $\theta$  24,5 dengan bidang (1 1 1) dan 2 $\theta$  40,43 dengan bidang (2 2 0). Begitu pula dengan data *peak list* paduan Dt5/CR20 yang menunjukkan posisi 2 $\theta$  24,38 dengan bidang (1 1 1) dan 2 $\theta$  40,25 dengan bidang (2 2 0). Data *peak list* paduan Dt5/CR26 juga memperlihatkan hal yang sama pada posisi 2 $\theta$  24,38 dengan bidang (1 1 1) dan 2 $\theta$  40,20 dengan bidang (2 2 0). *Peak* yang terbentuk ini teridentifikasi sebagai fasa Mg<sub>2</sub>Si dengan struktur kristal *cubic* menurut data ICDD *card* nomor PDF#00-034-0458. Seluruh *peak* Mg<sub>2</sub>Si ini tidak terlihat secara jelas pada pola XRD yang ditampilkan karena intensitasnya yang cenderung sangat kecil dan diabaikan dalam proses identifikasi fasa yang dilakukan.



#### 4.5 Hasil Pengujian Metalografi Paduan Aluminium 6061

Pengamatan struktur mikro paduan aluminium 6061 hasil coran dilakukan dengan pengujian metalografi sesuai standar ASTM E407-07. Pada paduan aluminium 6061, fasa yang mungkin terbentuk terbagi menjadi tiga kondisi dimana ketiganya memiliki fasa penguat yang sama yaitu  $Mg_2Si$  dan fasa utama  $\alpha-Al$  serta memiliki kemungkinan fasa impuritas berupa  $AlMnFeSi$ ,  $AlFeSi$ ,  $AlCrFeSi$  dalam jumlah yang tidak signifikan (Zhang, 2008). Kondisi pertama adalah ketika rasio Mg dan Si adalah 1,73 maka akan terbentuk fasa penguat berupa  $Mg_2Si$  dan semua unsur tembaga akan larut dalam fasa dasar yaitu  $\alpha-Al$ . Ketika rasio Mg dan Si kurang dari 1,08 ada kemungkinan akan terbentuk fasa *widmænstatten* ( $\omega$ ) dari  $Al_4CuMg_5Si_4$ . Ketika rasio Mg dan Si lebih dari 1,73 akan ada kemungkinan munculnya fasa  $\theta-CuAl_2$  dan fasa  $S-Al_2CuMg$  apabila unsur tembaga hadir dalam jumlah yang cukup untuk membentuk suatu fasa. Semua fasa tersebut dapat larut sebagian dalam struktur utama dan memiliki efek menguatkan meskipun efek yang diberikan relatif lebih kecil apabila dibandingkan dengan fasa  $Mg_2Si$ . (Wang, 2012). Fasa  $Mg_2Si$  inilah yang memberikan efek penguatan pada paduan yang dihasilkan. Gambar 4.6 hingga gambar 4.8 memperlihatkan hasil pengamatan struktur mikro seluruh paduan aluminium 6061 hasil coran berdasarkan perbedaan waktu *degassing* dan laju pendinginan.



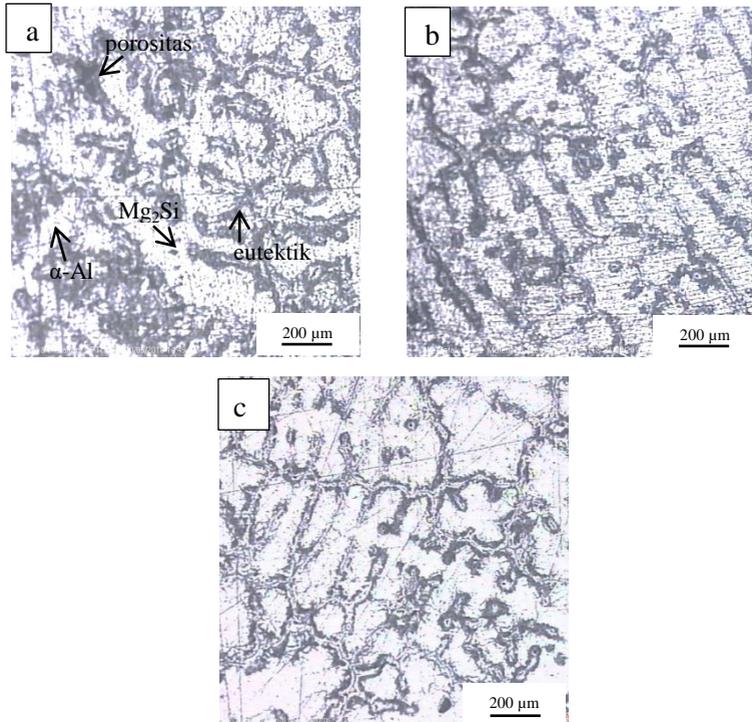
**Gambar 4.5** Hasil Pengamatan Struktur Mikro Paduan Aluminium 6061 (a) Dt2/CR13; (b) Dt2/CR20; (c) Dt2/CR26 pada perbesaran 50 kali

Gambar 4.5 (a),(b) dan (c) menunjukkan struktur mikro paduan aluminium yang diberi perlakuan waktu *degassing* selama 2 menit dengan laju pendinginan secara berturut-turut adalah 13 °C/menit, 20 °C/menit dan 26 °C/menit. Pada gambar tersebut dapat dilihat dua daerah yaitu gelap dan terang yang dapat direpresentasikan sebagai fasa  $\alpha$ -Al pada bagian yang terang dan fasa  $Mg_2Si$  titik-titik gelap yang tersebar dekat dengan batas butir. Pada Gambar 4.5 (a) dan (b) juga terlihat suatu bagian yang berwarna abu-abu lebih



gelap dari sekitarnya, bagian tersebut merupakan porositas yang terbentuk pada paduan. Porositas yang terbentuk pada laju pendinginan  $13\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{menit}$  dan  $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{menit}$  terlihat terpusat pada satu daerah dan membentuk ukuran yang relatif besar yaitu  $125\text{ }\mu\text{m}$  dan  $258\text{ }\mu\text{m}$  secara berturut-turut. Porositas ini merupakan porositas yang diakibatkan oleh adanya penyusutan atau *shrinkage* yang terjadi ketika proses solidifikasi. Porositas jenis ini cukup mudah dikenali karena bentuknya yang tidak beraturan dan biasanya terdapat didaerah antarmuka butir yang terbentuk. Porositas ini cenderung lebih mudah terbentuk ketika laju pendinginan paduan tidak terjadi secara merata dan mengakibatkan butir-butir ini saling berkontraksi menuju arah pendinginan dan meninggalkan ruang kosong pada daerah tersebut. Sedangkan pada Gambar 4.6 (c) ukuran porositas terlihat jauh lebih kecil dan berbentuk bulat hampir sempurna serta tersebar pada daerah antar lengan dendrit yang dapat diidentifikasi sebagai porositas yang diakibatkan oleh inklusi gas khususnya gas hidrogen pada paduan aluminium. Bentuk porositas yang cenderung bulat merupakan konsekuensi dari pembentukan gas yang tidak terlarut dalam paduan sehingga gas ini berusaha keluar namun tertahan oleh fasa atau dendrit yang sudah lebih dulu membeku. Hal ini sesuai dengan Gambar 2.7 yang memperlihatkan bentuk dari masing-masing jenis porositas. Inklusi oleh gas ini juga dapat disebabkan oleh kelembaban cetakan pasir dimana uap air terbentuk ketika cetakan terkena panas yang cukup tinggi. Porositas jenis ini cenderung terbentuk pada fasa yang disebut sebagai fasa interdendritik Al-Si eutektik. Fasa interdendritik ini dapat dikenali dari bentuknya yang seperti jarum yang tersusun secara bertumpuk-tumpuk atau biasa disebut *lamellar* dan terbentuk pada daerah antara dendrit (Kalhapure, 2013). Fasa ini terbentuk pada paduan Dt2/CR26 karena beberapa alasan salah satunya adalah kemungkinan bahwa lebih tingginya unsur Si pada paduan

ini sehingga tidak semua unsur silikon terbentuk sebagai fasa  $Mg_2Si$ .

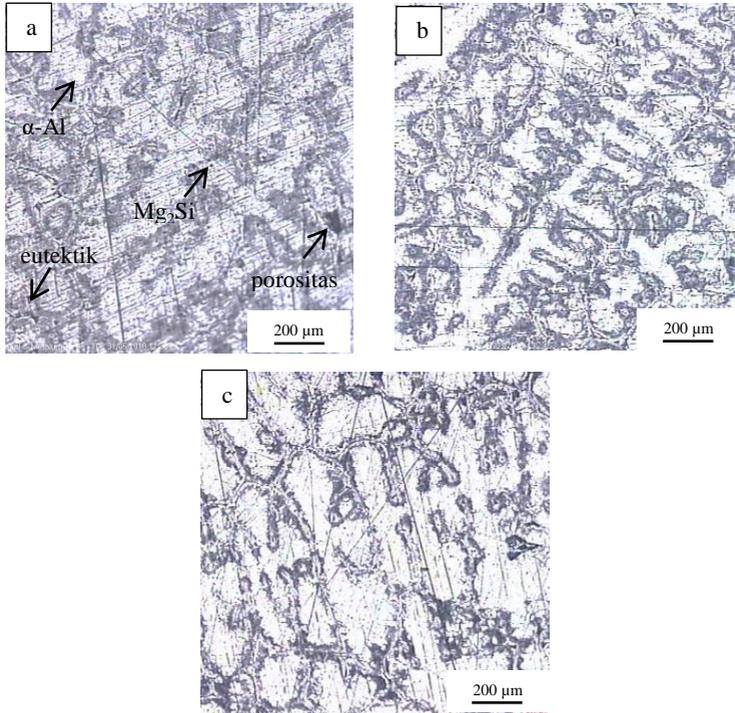


**Gambar 4.6** Hasil Pengamatan Struktur Mikro Paduan Aluminium 6061 (a) Dt5/CR13; (b) Dt5/CR20; (c) Dt5/CR26 pada perbesaran 50 kali

Pada Gambar 4.6(a) terlihat adanya porositas akibat penyusutan yang terbentuk dengan ukuran sekitar 221  $\mu m$ . Sedangkan pada Gambar 4.6(b) dan (c) dengan laju pendinginan yang lebih tinggi, porositas terbentuk dalam bentuk lingkaran dan ukuran yang jauh lebih kecil pada daerah interdendritik. Porositas ini dapat diidentifikasi



sebagai porositas akibat inklusi gas. Selain itu pada Gambar 4.6 (c) fasa interdendritik Al-Si eutektik juga muncul sebagai akibat dari kelebihan unsur silikon yang membentuk fasa terpisah dari fasa  $Mg_2Si$ .



**Gambar 4.7** Hasil Pengamatan Struktur Mikro Paduan Aluminium 6061 (a) Dt8/CR13; (b) Dt8/CR20; (c) Dt8/CR26 pada perbesaran 50 kali

Pada Gambar 4.7(a), (b) dan (c) terlihat hasil pengamatan struktur mikro paduan aluminium yang diberi perlakuan waktu *degassing* selama 8 menit dengan laju pendinginan secara berturut-turut adalah 13 °C/menit, 20



$^{\circ}\text{C}/\text{menit}$  dan  $26\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{menit}$ . Fasa yang terlihat dibedakan menjadi daerah gelap dan daerah yang lebih terang. Daerah terang dapat direpresentasikan sebagai fasa primer  $\alpha\text{-Al}$  dan bagian titik-titik gelap merupakan fasa penguat  $\text{Mg}_2\text{Si}$ . Porositas terlihat pada Gambar 4.7 (a) dengan ukuran  $44\text{ }\mu\text{m}$ , lebih kecil dari porositas akibat penyusutan yang terbentuk pada paduan yang diberi perlakuan waktu *degassing* selama 2 menit. Sedangkan fasa interdendritik Al-Si eutektik terlihat pada Gambar 4.7(b) dan (c) dengan jumlah yang relatif sedikit dan hanya menjadi fasa tambahan.

#### 4.5.1 Pengaruh Laju Pendinginan terhadap Ukuran DAS

Pada logam paduan hasil coran diamati pula secara kuantitatif ukuran *Dendrite Arm Spacing* (DAS). Pengukuran kuantitatif DAS ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh laju pendinginan terhadap ukuran DAS. Ukuran DAS ini sendiri akan berpengaruh terhadap nilai kekuatan tarik paduan. Tabel 4.5 memperlihatkan hasil perhitungan rata-rata ukuran DAS pada masing-masing logam paduan hasil coran.

**Tabel 4.5** Perhitungan Ukuran *Dendrite Arm Spacing* (DAS) Paduan Aluminium

Spesimen	Ukuran DAS ( $\mu\text{m}$ )
Dt2/CR13	135,4231
Dt5/CR13	137,1486
Dt8/CR13	139,3219
Dt2/CR20	111,1216
Dt5/CR20	110,2882
Dt8/CR20	109,5774
Dt2/CR26	85,9558
Dt5/CR26	88,6428
Dt8/CR26	88,141



Pada Tabel 4.5 terlihat secara kuantitatif hasil pengukuran rata-rata DAS pada masing-masing paduan aluminium hasil coran. Secara umum, ukuran DAS ini terlihat berkurang atau mengecil pada laju pendinginan yang lebih besar namun ukuran DAS ini tidak terlalu terpengaruh dengan pemberian waktu *degassing* yang berbeda. Pada paduan aluminium dengan laju pendinginan 13 °C/menit ukuran rata-rata DAS yang didapatkan adalah 135 µm, 137 µm dan 139 µm secara berturut-turut.

Pada paduan aluminium hasil coran yang mendapatkan laju pendinginan 20 °C/menit ukuran DAS yang dihasilkan terlihat berkurang apabila dibandingkan dengan laju pendinginan sebelumnya. Ukuran rata-rata DAS yang terukur pada paduan aluminium ini secara berturut-turut sesuai waktu *degassing* yang diberikan adalah 111 µm, 110 µm dan 109 µm. Hasil pengukuran rata-rata ini berkurang sebesar 19,6% apabila dibandingkan dengan paduan yang mendapatkan laju pendinginan 13 °C/menit.

Selanjutnya pada paduan aluminium hasil coran yang mendapatkan laju pendinginan sebesar 26 °C/menit, pengukuran rata-rata DAS menghasilkan nilai sebesar 86 µm, 89 µm dan 88 µm secara berturut-turut sesuai dengan waktu *degassing* yang diberikan pada paduan aluminium dan dapat dihitung bahwa ukuran ini berkurang sebesar 20,5% apabila dibandingkan dengan paduan aluminium yang mendapatkan laju pendinginan 20 °C/menit.

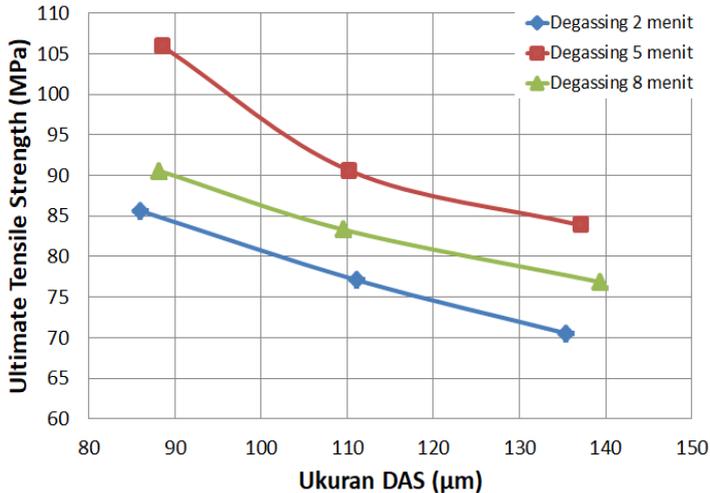
Berkurangnya ukuran DAS seiring dengan bertambahnya laju pendinginan ini sesuai dengan teori yang ada bahwa laju pendinginan memberikan pengaruh yang cukup besar dalam pertumbuhan dendrit pada hasil coran. Laju pendinginan pada proses solidifikasi berperan dalam mengendalikan waktu solidifikasi



sehingga difusi dari zat yang terlarut dan membentuk dendrit semakin kecil. Artinya, ketika proses solidifikasi terjadi, dendrit akan semakin sulit membentuk lengan dendrit. Hal ini menghasilkan lengan dendrit yang lebih kecil dan rapat dibandingkan dengan pendinginan lambat (Horwath, 1962). Pembentukan dendrit yang semakin sulit karena difusi yang semakin kecil ini memaksa logam cair yang semakin lama semakin dingin untuk membentuk dendrit-dendrit baru sehingga dendrit-dendrit akan semakin banyak terbentuk dengan ukuran yang lebih kecil pada laju pendinginan yang lebih besar. Peningkatan laju pendinginan secara signifikan akan meningkatkan jumlah inti yang terbentuk dan mempengaruhi ukuran butir dan *Dendrite Arm Spacing* (DAS) pada paduan aluminium.

#### 4.5.2 Pengaruh Ukuran DAS terhadap UTS

Pada hasil pengujian tarik masing-masing paduan aluminium hasil coran, ukuran *Dendrite Arm Spacing* (DAS) juga terlihat mempengaruhi nilai kekuatan tarik dalam hubungannya dengan penambahan laju pendinginan. Secara keseluruhan, paduan yang terbentuk pada laju pendinginan 13 °C/menit memiliki ukuran DAS yang paling besar dibandingkan dengan yang lain sehingga paduan menghasilkan nilai kekuatan tarik yang secara rata-rata paling kecil. Sedangkan pada laju pendinginan 26 °C/menit, ukuran DAS yang terukur merupakan yang paling kecil diantara ketiganya sehingga menghasilkan paduan dengan nilai kekuatan tarik yang secara rata-rata paling besar diantara laju pendinginan yang lain. Hal ini menunjukkan bahwa ukuran DAS juga memberikan pengaruh. Secara lebih lengkap, Gambar 4.8 memperlihatkan grafik hubungan antara ukuran DAS dengan nilai kekuatan tarik yang terukur.



**Gambar 4.8** Grafik Hubungan antara Ukuran DAS dengan UTS Paduan Aluminium Hasil Coran

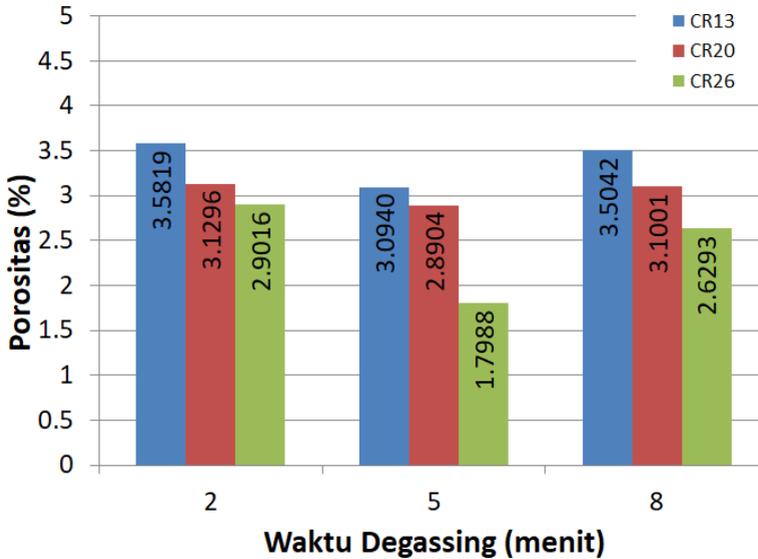
Dari Gambar 4.8 dapat dilihat bahwa paduan yang diberi perlakuan *degassing* selama 5 menit secara rata-rata menghasilkan nilai kekuatan tarik yang paling tinggi. Sedangkan paduan dengan waktu *degassing* selama 2 menit secara rata-rata menghasilkan nilai kekuatan tarik yang paling rendah. Dalam hubungannya dengan ukuran DAS, peningkatan kekuatan ini dapat dikaitkan dengan ukuran butir pada paduan aluminium hasil coran. Pada paduan aluminium dengan ukuran DAS yang lebih kecil maka ukuran butir menjadi semakin kecil dan begitu pula sebaliknya. Dengan semakin kecilnya ukuran butir ini maka secara otomatis batas butir akan semakin banyak dan meningkatkan efek *grain boundary strengthening* secara signifikan dimana batas butir ini menjadi penghalang bagi terjadinya dislokasi pada paduan. Hal ini tentunya akan meningkatkan kekuatan tarik dan elongasi paduan



tersebut. Selain itu, berkurangnya ukuran DAS pada paduan aluminium dilaporkan mengakibatkan distribusi *microporosity*, segregasi intergranular dan segregasi impuritas semakin jarang terjadi (Zhang et al., 2008).

#### 4.6 Hasil Pengujian Tingkat Porositas Paduan Aluminium 6061

Porositas merupakan salah satu jenis cacat yang mungkin terbentuk dari proses pengecoran. Porositas dapat disebabkan karena adanya udara yang terperangkap dan tidak bisa keluar dari dalam *molten metal* hingga selesainya proses pembekuan (solidifikasi) logam dalam cetakan. Udara yang terperangkap inilah yang membentuk gelembung-gelembung gas didalam logam cair dan menjadi pori-pori di dalam benda cor (Campbell, 2003). Udara yang terperangkap dalam benda cor ini dapat bersumber dari kelembaban cetakan dimana kadar air yang terkandung dalam cetakan ini akan membentuk uap air ketika terkena panas dari logam cair. Selain itu gelembung udara ini juga dapat disebabkan oleh adanya gas hidrogen yang terperangkap dalam logam cair. Disisi lain, porositas juga dapat disebabkan oleh adanya penyusutan pada proses solidifikasi logam cair. Penyusutan menyebabkan butir-butir mengalami kontraksi dari arah yang berbeda-beda dan meninggalkan ruang kosong di bagian tengah hasil coran atau diantara butir-butir tadi. Secara umum, porositas merupakan hal yang tidak diinginkan untuk terjadi pada produk benda coran karena porositas menyebabkan sifat mekanik hasil coran menurun khususnya pada kekuatan tarik (Wasiu,2012). Gambar 4.9 memperlihatkan hasil pengujian densitas masing-masing paduan aluminium hasil coran yang kemudian diinterpretasikan kedalam tingkat porositas (%) dalam paduan menurut perbandingan densitas terukur dan densitas paduan yang terdapat dalam teori yaitu  $2,7 \text{ g/cm}^3$ .



**Gambar 4.9** Tingkat Porositas pada Paduan Aluminium 6061 Hasil Coran

Pada Gambar 4.9 dapat dilihat bahwa tingkat porositas tertinggi dengan angka 3,5819% terdapat pada paduan aluminium dengan nama Dt2/CR13 yaitu paduan yang mendapatkan *degassing* selama 2 menit dan diberi laju pendinginan 13 °C/menit. Sedangkan tingkat porositas paling rendah dengan angka 1,7988% terdapat pada paduan aluminium dengan nama spesimen Dt5/CR26 yaitu spesimen yang mendapatkan waktu *degassing* selama 5 menit dengan laju pendinginan sebesar 26 °C/menit. Secara umum, dapat dilihat bahwa tingkat porositas mengalami penurunan paling optimum ketika waktu *degassing* yang diberikan pada paduan ditingkatkan dari 2 menit menjadi 5 menit namun lebih jauh lagi, tingkat porositas ini terlihat meningkat kembali ketika paduan aluminium diberi waktu *degassing* yang lebih lama yaitu 8 menit. Selain itu, laju pendinginan



juga terlihat memberikan pengaruh pada banyaknya porositas yang terbentuk pada paduan-paduan aluminium ini. Paduan yang mendapat laju pendinginan lebih besar akan menghasilkan paduan yang memiliki tingkat porositas lebih rendah. Berbeda dengan pengaruh waktu *degassing* pada paduan aluminium, pengaruh laju pendinginan terhadap porositas ini terlihat memberikan tren yang linear seiring dengan bertambahnya laju pendinginan.

Hal tersebut dapat dikaitkan dengan ukuran *Dendrite Arm Spacing* (DAS) yang lebih kecil pada laju pendinginan yang lebih besar. Dengan ukuran DAS yang lebih kecil atau lebih rapat, maka pembentukan porositas akan terhambat dan menghasilkan porositas yang lebih sedikit. Sedangkan *degassing* memberikan pengaruh dengan cara mengurangi konsentrasi hidrogen yang terlarut dalam logam cair sehingga gelembung gas hidrogen yang terbentuk semakin berkurang. Namun pada pemberian waktu *degassing* yang lebih lama yaitu 8 menit, tren mengalami penurunan. Hal ini diakibatkan karena adanya kemungkinan bahwa gelembung gas inert mencapai titik jenuh terhadap hidrogen yang berdifusi pada gelembung gas inert. Titik jenuh ini kemungkinan dicapai pada waktu antara 5 menit dan 8 menit menurut data yang didapat. Ketika gas inert ini telah mengalami titik jenuh maka gas inert ini tidak mampu lagi memerangkap gas hidrogen dan hal ini memberi waktu bagi gas hidrogen dari atmosfer untuk berdifusi kembali kedalam logam cair paduan. Kembali berdifusinya gas hidrogen ini menyebabkan konsentrasi gas hidrogen dalam logam cair meningkat kembali dan tidak dapat berkurang dengan penambahan waktu *degassing* pada logam cair. Salah satu cara untuk mengurangi konsentrasi gas hidrogen pada saat jenuh adalah dengan meningkatkan volume gas yang dimasukkan kedalam logam cair seiring dengan penambahan waktu *degassing*.

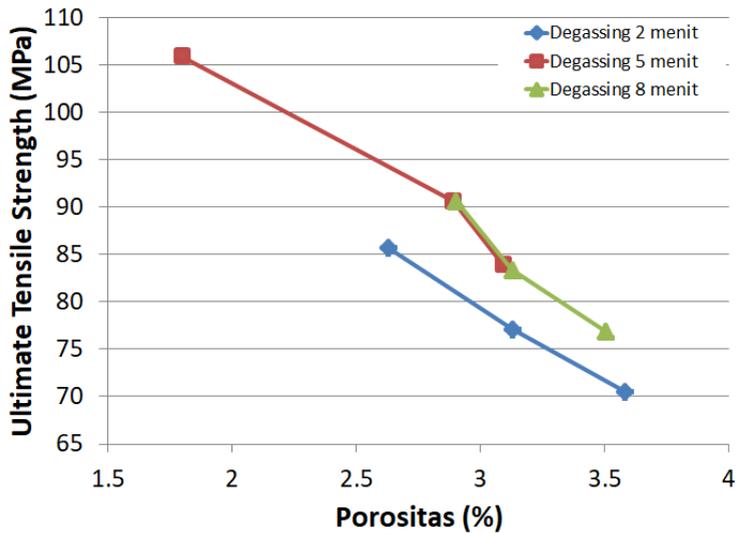


#### 4.6.1 Pengaruh Tingkat Porositas terhadap UTS

Pada data tingkat porositas, paduan Dt2/CR13 tercatat memiliki tingkat porositas paling tinggi apabila dibandingkan dengan paduan lain. Sedangkan paduan Dt5/CR26 terlihat memiliki tingkat porositas yang paling rendah apabila dibandingkan dengan paduan yang lainnya. Hal ini secara tegas menunjukkan bahwa tingkat porositas memberikan pengaruh yang buruk pada sifat mekanik paduan aluminium khususnya pada nilai kekuatan tarik paduan. Secara lebih lanjut, Tabel 4.6 menunjukkan hubungan antara tingkat porositas dengan nilai kekuatan tarik pada masing-masing paduan.

**Tabel 4.6** Pengaruh Tingkat Porositas terhadap UTS

Spesimen	Tingkat Porositas (%)	UTS (MPa)
Dt2/CR13	3,5819	70,53
Dt5/CR13	3,0940	83,87
Dt8/CR13	3,5042	76,87
Dt2/CR20	3,1296	77,1
Dt5/CR20	2,8904	90,6
Dt8/CR20	3,1001	83,33
Dt2/CR26	2,9016	85,67
Dt5/CR26	1,7988	105,9
Dt8/CR26	2,6293	90,6



**Gambar 4.10** Grafik Hubungan antara Tingkat Porositas dan Nilai Kekuatan Tarik Paduan

Pada Gambar 4.10 dapat dilihat data tingkat porositas paduan hasil coran yang di plot terhadap nilai kekuatan tarik yang didapatkan. Selain itu ditampilkan pula garis tren yang menunjukkan tren pengaruh tingkat porositas terhadap nilai kekuatan tarik paduan. Garis tren pada Gambar 4.10 dengan jelas menunjukkan bahwa semakin kecil tingkat porositas paduan maka semakin tinggi nilai kekuatannya, begitu pula sebaliknya. Hal ini mengindikasikan bahwa tingkat porositas pada suatu paduan akan sangat berpengaruh terhadap sifat mekaniknya. Meskipun pada penelitian ini belum mampu untuk memastikan bahwa porositas yang terbentuk merupakan porositas akibat inklusi gas hidrogen atau porositas akibat penyusutan mikro namun pada umumnya porositas pada paduan hasil pengecoran secara fisik merupakan rongga-rongga kosong. Ketika



---

rongga-rongga kosong ini mendapatkan tegangan tarik maka akan terjadi pemusatan tegangan pada daerah sekitar rongga ini sehingga akan memicu munculnya *initial crack* yang kemudian terus menjalar hingga akhirnya material mengalami *fracture* atau patah. Dengan memahami sifat dan peran porositas ini maka dapat dipahami bahwa semakin tinggi tingkat porositas pada suatu paduan maka semakin rendah nilai kekuatan tarik paduan tersebut.

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Kesimpulan dari penelitian ini adalah:

1. Hasil kekuatan tarik yang optimum diperoleh dari kombinasi antara waktu *degassing* 5 menit dan laju pendinginan 26 °C/menit dimana dihasilkan nilai kekuatan tarik tertinggi sebesar 105,9 MPa.
2. Pada kombinasi waktu *degassing* 5 menit dan laju pendinginan 26 °C/menit didapatkan tingkat porositas paling rendah yaitu 1,8% dan ukuran DAS paling kecil yaitu 88,64 µm.
3. Secara keseluruhan nilai kekuatan tarik mengalami peningkatan sebesar 26,27% pada kombinasi waktu *degassing* 5 menit dan laju pendinginan 26 °C/menit.

#### **5.2 Saran**

Saran yang dapat dipertimbangkan untuk penelitian terkait selanjutnya adalah:

1. Menggunakan termokopel *probe* yang tertanam dalam cetakan pada dasar *pattern* sehingga laju pendinginan dapat diukur lebih akurat.
2. Menggunakan media pendingin yang lebih signifikan sehingga pengaruh laju pendinginan lebih terlihat.
3. Menggunakan desain cetakan dan metode pendinginan yang lebih efektif sehingga efek pendinginan lebih merata dan efisien.
4. Dapat diteliti pula pengaruh laju pendinginan terhadap kekuatan lelah atau *fatigue strength*.



*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR PUSTAKA

- \_\_\_\_\_. 1992. *ASM Handbook Volume 2 : Properties and Selection : Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*. ASM International Handbook Committee
- \_\_\_\_\_. 1992. *ASM Handbook Volume 3 : Alloy Phase Diagrams*. ASM International Handbook Committee
- \_\_\_\_\_. 1992. *ASM Handbook Volume 15 : Casting*. ASM International Handbook Committee
- Anyalebechi, Princewill. 2004. *Effects of Alloying Elements and Solidification Conditions on Secondary Dendrite Arm Spacing in Aluminum Alloys*. USA: The Minerals, Metals and Materials Society.
- Banga, T. 1981. *Foundry Engineering*. New Delhi: Khanna Publisher
- Beckermann, C et al. (2007). *Modelling the effect of finite-rate hydrogen diffusion on porosity formation in aluminum alloys*. *Metallurgical Material Transactions B Vol. 38*, pp541-555.
- Callister, William. 2008. *Material Science and Engineering An Introduction 8th Edition*. New York : JohnWiley & Sons, Inc.
- Campbell, J. 2003. *Casting*. New York: ASM International.
- Chun, Michael & Yung Niu. 1988. *Airframe Structural Design*. California: Conmilit Press Ltd.

- Davis, J.R. 2001. *ASM Specialty Handbook: Aluminum and Aluminum Alloys*. ASM International Handbook Committee
- Felberbaum, Milan. 2010. *Porosity in Aluminum Alloys: Visualization, Characterization, and Modelling*. Suisse: École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Glazoff, Michael V., et al. 2007. *Casting Aluminum Alloys*. Pittsburgh: Elsevier.
- Groover, M. 2010. *Fundamental Of Modern Manufacture 4th Edition*. USA : JohnWiley & Sons, Inc.
- Hesse, Alfred H. (1941). *Some Causes for Porosity and Leakage in Non-ferrous Castings*. *Professional Degree Theses*, pp283.
- Kalhapure, Milind G. 2013. *Impact Of Silicon Content On Mechanical Properties Of Aluminum Alloy*. India : Department of Physics, P.V.P. College.
- Major, J.F. (2002). *Porosity Control and Fatigue Behavior in A356-T61 Aluminum Alloy*. *AFS Transactions*, pp901-906.
- Rambabu, P et al. (2017). *Aerospace Materials dan Material Technologies*. *Indian Institute of Metals Series*, pp29-52.
- Sigworth, G.K. (2014). *Best Practices in Aluminum Metalcasting*. *American Foundry Society*.
- Soler, Manuel. (2004). *Fundamentals of Aerospace Engineering: An Introductory Course to Aeronautical Engineering*. Madrid: Create Space.

- Spear, R.E & Gardner G.R. (1963). *Dendrite Cell Size*. USA: American Foundry Society.
- Surdia, T. (2000). **Pengetahuan Bahan Teknik**. Jakarta: PT. Pradnya Paramita.
- Viswanathan, Q. H. (2002). *Hydrogen Evolution during Directional Solidification and Its Effect on Porosity Formation in Aluminum Alloys*. *Metallurgical and Materials Transactions A*, pp2067-2072.
- Wang H.Q., et al. (2012). *Microstructure Analysis on 6061 Aluminum Alloy after Casting and Diffuses Annealing Process*. *Physics Procedia*, pp68-75.
- Warke, V.S. (2003). *Removal of Hydrogen and Solid Particles from Molten Aluminum Alloys in The Rotating Impeller Degasser: Mathematical Models and Computer Simulations*. Worcester Polytechnic Institute.
- Zhang B et al. (2000). *Effect of Solidification Cooling Rate on the Fatigue Life of A356.2-T6 Cast Aluminum Alloy*. *Journal Materials and Processing Technology*. pp 54-65.
- Zhang B et al. (2008). *Effect of Cooling Rate on Solidified Microstructure and Mechanical Properties of Aluminum A356 Alloy*. *Journal Materials and Processing Technology*. pp 107-111.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

# LAMPIRAN

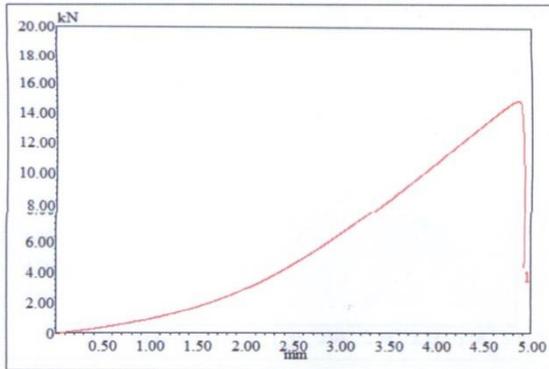
## 1. Hasil Uji Tarik Dt2/CR13



**Laboratorium Metalurgi**  
 Jurusan Teknik Material dan Metalurgi  
 Fakultas Teknologi Industri  
 Institut Teknologi Sepuluh Nopember - Surabaya

Test Date : 21-05-2018

**Test Result**



Specimen Code	Width mm	Thickness mm	Area mm <sup>2</sup>	Yield Point N	Yield Str. MPa	Max. Load N	UTS MPa	% Elong
D3-01-1	12.50	17.00	212.50	13200.1	62.1	15651.7	73.7	
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---







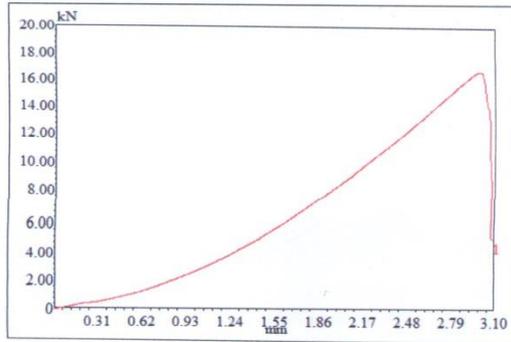






Test Date : 21-05-2018

**Test Result**



Specimen Code	Width mm	Thickness mm	Area mm <sup>2</sup>	Yield Point N	Yield Str. MPa	Max. Load N	UTS MPa	% Elong
D8-01-2	12.50	17.00	212.50	15105.1	71.1	17125.3	80.6	
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---

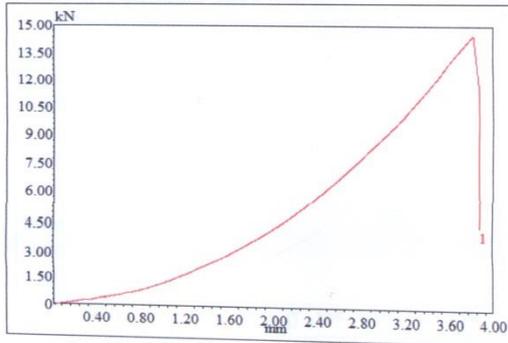






Test Date : 21-05-2018

### Test Result

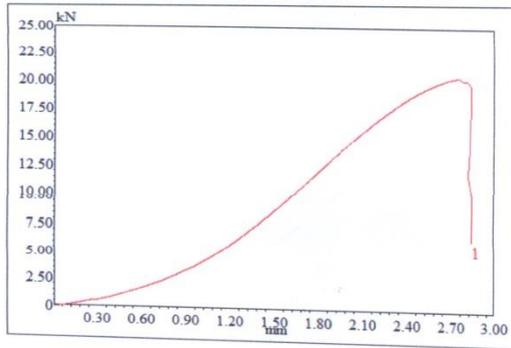


Specimen Code	Width mm	Thickness mm	Area mm <sup>2</sup>	Yield Point N	Yield Str. MPa	Max. Load N	UTS MPa	% Elong
D2-02-3	12.50	17.00	212.50	11860.6	55.8	14505.2	68.3	
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---



Test Date : 21-05-2018

**Test Result**



Specimen Code	Width mm	Thickness mm	Area mm <sup>2</sup>	Yield Point N	Yield Str. MPa	Max. Load N	UTS MPa	% Elong
D5-02-2	12.50	17.00	212.50	20749.4	97.6	20821.6	98.0	
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---



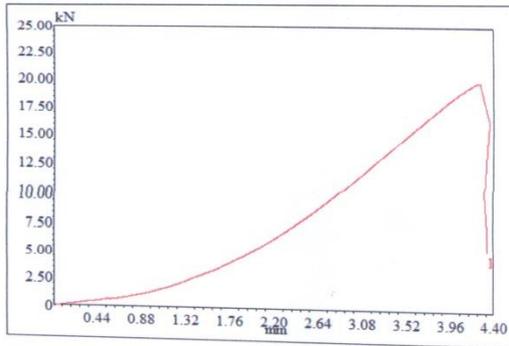
## 6. Hasil Uji Tarik Dt5/CR26



**Laboratorium Metalurgi**  
 Jurusan Teknik Material dan Metalurgi  
 Fakultas Teknologi Industri  
 Institut Teknologi Sepuluh Nopember - Surabaya

Test Date : 21-05-2018

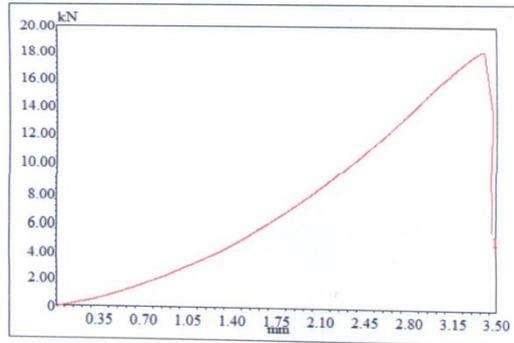
**Test Result**



Specimen Code	Width mm	Thickness mm	Area mm <sup>2</sup>	Yield Point N	Yield Str. MPa	Max. Load N	UTS MPa	% Elong
D8-02-1	12.50	17.00	212.50	17122.1	80.6	20429.0	96.1	
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Test Date : 21-05-2018

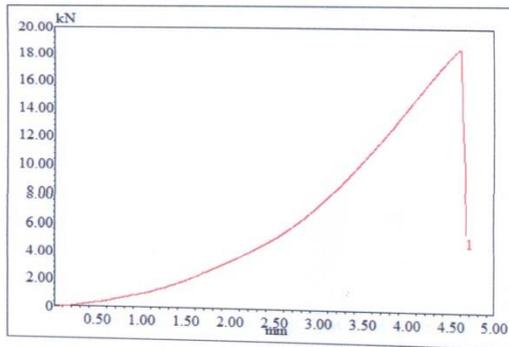
### Test Result



Specimen Code	Width mm	Thickness mm	Area mm <sup>2</sup>	Yield Point N	Yield Str. MPa	Max. Load N	UTS MPa	% Elong
D8-02-2	12.50	17.00	212.50	14396.8	67.7	18468.3	86.9	
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Test Date : 21-05-2018

### Test Result

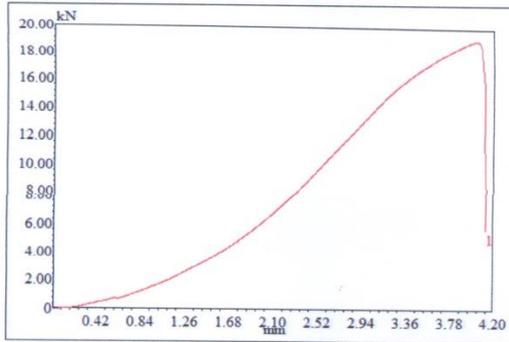


Specimen Code	Width mm	Thickness mm	Area mm <sup>2</sup>	Yield Point N	Yield Str. MPa	Max. Load N	UTS MPa	% Elong
D8-02-3	12.50	17.00	212.50	14367.9	67.6	18663.5	87.8	
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---



Test Date : 21-05-2018

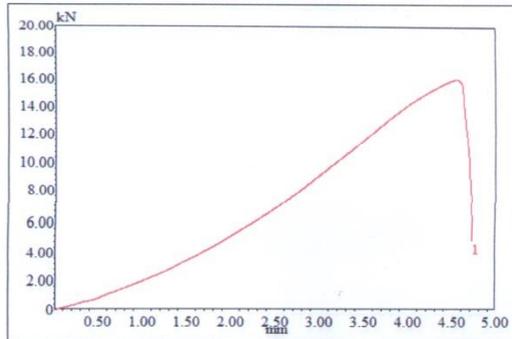
**Test Result**



Specimen Code	Width mm	Thickness mm	Area mm <sup>2</sup>	Yield Point N	Yield Str. MPa	Max. Load N	UTS MPa	% Elong
D2-03-2	12.50	17.00	212.50	18995.1	89.4	19175.9	90.2	
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Test Date : 21-05-2018

**Test Result**



Specimen Code	Width mm	Thickness mm	Area mm <sup>2</sup>	Yield Point N	Yield Str. MPa	Max. Load N	UTS MPa	% Elong
D2-03-3	12.50	17.00	212.50	15449.9	72.7	16529.2	77.8	
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---

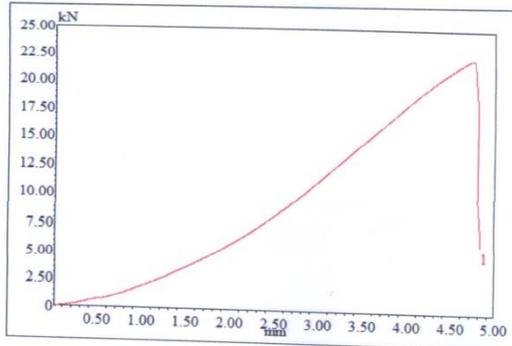
## 8. Hasil Uji Tarik Dt8/CR20



**Laboratorium Metalurgi**  
 Jurusan Teknik Material dan Metalurgi  
 Fakultas Teknologi Industri  
 Institut Teknologi Sepuluh Nopember - Surabaya

Test Date : 21-05-2018

**Test Result**

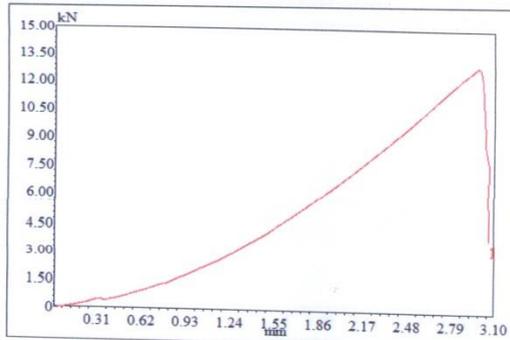


Specimen Code	Width mm	Thickness mm	Area mm <sup>2</sup>	Yield Point N	Yield Str. MPa	Max. Load N	UTS MPa	% Elong
D5-03-1	12.50	17.00	212.50	18750.4	88.2	22590.9	106.3	
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---



Test Date : 21-05-2018

**Test Result**

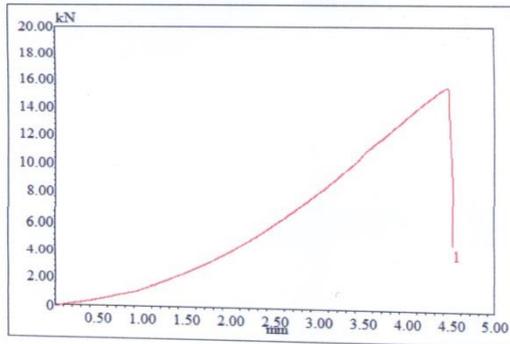


Specimen Code	Width mm	Thickness mm	Area mm <sup>2</sup>	Yield Point N	Yield Str. MPa	Max. Load N	UTS MPa	% Elong
D5-03-3	12.50	17.00	212.50	11534.6	54.3	13162.6	61.9	
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---



Test Date : 21-05-2018

**Test Result**



Specimen Code	Width mm	Thickness mm	Area mm <sup>2</sup>	Yield Point N	Yield Str. MPa	Max. Load N	UTS MPa	% Elong
D8-03-2	12.50	17.00	212.50	11539.0	54.3	15999.6	75.3	
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---



## 10. ICDD Card Fasa Al PDF#00-004-0787

### References

Primary reference: Swanson, Tatge., *Natl. Bur. Stand. (U. S.), Circ. 539, I, 11, (1953)*

### Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	1	1	2.33800	38.473	100.0
2	2	0	0	2.02400	44.740	47.0
3	2	2	0	1.43100	65.135	22.0
4	3	1	1	1.22100	78.230	24.0
5	2	2	2	1.16900	82.438	7.0
6	4	0	0	1.01240	99.081	2.0
7	3	3	1	0.92890	112.046	8.0
8	4	2	0	0.90550	116.574	8.0
9	4	2	2	0.82660	137.463	8.0

## 11. ICDD Card Fasa Al PDF#00-034-0458

### References

Primary reference: Friel, J., Bethlehem Steel Corporation, Bethlehem, Pennsylvania, USA., *Private Communication*, (1983)  
Unit cell: *Ibid.*, *Private Communication*  
Optical data: *Ibid.*, *Private Communication*

### Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	1	1	3.66000	24.299	40.0
2	2	0	0	3.18000	28.037	8.0
3	2	2	0	2.24500	40.134	100.0
4	3	1	1	1.91500	47.437	15.0
5	2	2	2	1.83400	49.671	5.0
6	4	0	0	1.58800	58.035	15.0
7	3	3	1	1.45700	63.834	10.0
8	4	2	0	1.42000	65.703	3.0
9	4	2	2	1.29650	72.902	35.0
10	3	3	3	1.22240	78.123	5.0
11	4	4	0	1.12280	86.637	10.0
12	5	3	1	1.07370	91.685	5.0
13	4	4	2	1.05860	93.381	1.0
14	6	2	0	1.00440	100.157	10.0
15	5	3	3	0.96870	105.346	1.0
16	6	2	2	0.95760	107.106	1.0
17	4	4	4	0.91680	114.324	2.0
18	5	5	1	0.88940	120.015	2.0
19	6	4	0	0.88070	122.006	1.0
20	6	4	2	0.84870	130.358	8.0
21	7	3	1	0.82680	137.391	2.0

## 12. Hasil OES Al ingot

LOT NO.	Al *	Si	Fe	Zn	Ga	V	Cu	Mg	Mn	Ti	OTHER1	OTHE
	99.93	0.03	0.04	0.00	<0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		

PRIMARY ALUMINIUM INGOTS  
99.92 PCT. AL. MIN.,

ANALYZED IN ACCORDANCE WITH JIS H2102

This report is printed automatically by a computer and  
no signature of authorized officer

# 13. Hasil OES Mg ingot

POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA  
LABORATORIUM DT NDT

## OES Chemical Results

Sample ID : 1 Material : Mg  
 Customer : Sdr. Rendi (T. MATERIAL) Dimension : -  
 Lab-no. : UJI BAHAN Heat-no. : -  
 Operator : ELHAM Ka. Laboratorium : M. THORIQ WAHYUDI  
 Date: 20/01/2017

Spektralanalyse Foundry-MASTER Grade :

	Mg	Al	Be	Cu	Fe	Mn	Ni	Si
1	99.0	0.263	0.0002	< 0.0020	0.0069	< 0.0020	0.0423	0.191
2	98.9	0.219	0.0002	< 0.0020	0.0032	< 0.0020	> 0.0450	0.149
3	98.9	0.220	0.0002	< 0.0020	< 0.0010	< 0.0020	> 0.0450	0.0951
Ave	99.0	0.234	0.0002	< 0.0020	0.0034	< 0.0020	> 0.0450	0.145

	Zn	Ag	Ca	Cd	Pb	Sn	Sr	Ce
1	0.0010	0.0016	0.0034	0.0004	0.0432	0.0546	0.0006	0.0411
2	0.0010	0.0026	0.0032	0.0004	0.120	0.0943	0.0006	0.0439
3	0.0010	< 0.0010	0.0037	0.0004	0.213	0.0773	0.0006	0.0477
Ave	0.0010	0.0014	0.0034	0.0004	0.126	0.0787	0.0006	0.0442

	Dy	Er	Gd	Ho	La	Lu	Nd	Pr
1	< 0.0050	< 0.0050	0.0108	< 0.0050	0.0046	< 0.0005	0.0826	0.0728
2	< 0.0050	< 0.0050	< 0.0050	< 0.0050	0.0078	< 0.0005	0.0762	0.0781
3	< 0.0050	< 0.0050	0.0056	< 0.0050	0.0049	< 0.0005	0.0602	0.0797
Ave	< 0.0050	< 0.0050	0.0055	< 0.0050	0.0058	< 0.0005	0.0830	0.0769

	Sm	Tb	Th	Tm	Y	Yb	Zr	Lj
1	< 0.0050	0.0005	0.103	< 0.0050	0.0128	0.0018	0.0084	0.0022
2	< 0.0050	0.0006	0.132	< 0.0050	0.0103	0.0015	0.0083	0.0024
3	< 0.0050	0.0006	0.100	< 0.0050	0.0114	0.0021	0.0081	0.0023
Ave	< 0.0050	0.0006	0.112	< 0.0050	0.0115	0.0018	0.0076	0.0023

# 14. Hasil OES Al-Si

POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA  
LABORATORIUM DT NDT

## OES Chemical Results

Sample ID : 1 Material : Al-Si  
 Customer : Sdr. Rendi (T. MATERIAL) Dimension : -  
 Lab-no. : UJI BAHAN Heat-no. : -  
 Operator : ELHAM Ka. Laboratorium : M. THORIQ WAHYUDI  
 Date: 20/01/2017

Spektralanalyse Foundry-MASTER Grade :

	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Co
1	91.5	7.94	0.210	0.0066	0.0063	0.0595	0.0044	< 0.0001
2	91.6	7.87	0.186	0.0108	0.0066	0.0601	0.0044	< 0.0001
3	91.5	7.94	0.186	0.0085	0.0067	0.0602	0.0052	< 0.0001
Ave	91.5	7.92	0.194	0.0087	0.0065	0.0599	0.0047	< 0.0001
	Ni	Ti	Be	Ca	Li	Pb	Sn	Sr
1	0.0220	0.137	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	0.0089	< 0.0005	0.0005
2	0.0180	0.136	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	0.0097	< 0.0005	0.0005
3	0.0194	0.137	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	0.0089	< 0.0005	0.0005
Ave	0.0198	0.136	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	0.0091	< 0.0005	0.0005
	V	Na	Bi	Zr	B	Ga	Cd	Co
1	0.0158	< 0.0001	0.0010	0.0020	< 0.0001	0.0158	0.0030	< 0.0010
2	0.0126	< 0.0001	< 0.0005	0.0012	< 0.0001	0.0151	0.0029	< 0.0010
3	0.0168	< 0.0001	0.0007	0.0010	< 0.0001	0.0153	0.0029	< 0.0010
Ave	0.0150	< 0.0001	0.0005	0.0014	< 0.0001	0.0154	0.0029	< 0.0010
	Ag	Hg	In	Sb	P	As	Ce	La
1	< 0.0001	< 0.0005	< 0.0020	< 0.0050	< 0.0020	0.0070	0.0062	0.0030
2	< 0.0001	< 0.0005	< 0.0020	< 0.0050	< 0.0020	0.0079	0.0072	0.0038
3	< 0.0001	< 0.0005	< 0.0020	< 0.0050	< 0.0020	< 0.0030	0.0045	0.0039
Ave	< 0.0001	< 0.0005	< 0.0020	< 0.0050	< 0.0020	0.0060	0.0060	0.0035



## 16. Perhitungan Tingkat Porositas Paduan

Spesimen	Massa (gr)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Densitas (g/cm <sup>3</sup> )	Porositas (%)	Rata-Rata
D2-01	15.1827	5.8334	2.6027	3.6030	3.5819
	15.8312	6.0799	2.6039	3.5608	
D5-01	15.6318	5.9858	2.6115	3.2785	3.0940
	16.2781	6.2096	2.6214	2.9096	
D8-01	15.3761	5.9108	2.6014	3.6535	3.5042
	19.6849	7.5438	2.6094	3.3550	
D2-02	17.8824	6.8125	2.6249	2.7800	3.1296
	16.6866	6.4030	2.6061	3.4793	
D5-02	14.9495	5.7506	2.5996	3.7170	2.8904
	17.2145	6.5101	2.6443	2.0639	
D8-02	15.8516	6.0567	2.6172	3.0666	3.1001
	16.8217	6.4318	2.6154	3.1335	
D2-03	17.1238	6.5337	2.6208	2.9318	2.9016
	17.5653	6.6980	2.6225	2.8715	
D5-03	17.0117	6.4144	2.6521	1.7737	1.7988
	18.7101	7.0584	2.6508	1.8238	
D8-03	16.4855	6.2801	2.6250	2.7764	2.6293
	19.0425	7.2323	2.6330	2.4822	

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Surabaya, 16 September 1996, merupakan anak bungsu dari 3 bersaudara. Penulis menempuh pendidikan formal di SDK Santo Yusup Tropodo, SMP Santo Carolus Surabaya dan SMA Santo Carolus Surabaya. Setelah itu penulis melanjutkan pendidikan tinggi di Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS. Selain itu, penulis juga sempat menempuh pendidikan formal di *Shibaura Institute of Technology*, Jepang sebagai *exchange student* selama satu semester di tahun 2017. Penulis pernah mengikuti Magang Ormawa yang diselenggarakan oleh *International Office ITS* di Thailand serta acara *Youth Excursion* di Malaysia. Penulis pernah menjadi asisten laboratorium fisika material dan grader mata kuliah teknologi pengecoran. Pengalaman kerja praktek penulis didapatkan di PT. TRANE Indonesia sebagai *maintenance engineer* untuk sistem pendingin mall ‘City of Tomorrow’ selama 2 bulan. Di bidang non akademis penulis sempat aktif sebagai Senat Mahasiswa Jurusan Teknik Material dan Metalurgi (SM3) di tahun 2016 dan terpilih menjadi koordinator Senat Mahasiswa di tahun kepengurusan berikutnya. Penulis juga pernah mendapatkan beasiswa dari PT. Toyota Astra selama satu tahun dan juga menerima pendanaan dari Kemenristekdikti untuk Program Kreativitas Mahasiswa (PKM) bidang kewirausahaan dengan membuat usaha furniture berbahan dasar komposit kardus dan serbuk kayu sebagai solusi permasalahan limbah kardus bekas.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*