



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**POROSITAS GAS PADUAN DURALUMIN PADA  
PENGECORAN SISTEM VAKUM**

**SKRIPSI**

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

**ABDURAHMAN ALATAS  
0706268165**

**FAKULTAS TEKNIK  
DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL  
DEPOK  
JUNI 2011**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Abdurahman Alatas  
NPM : 0706268165

Tanda Tangan :



Tanggal : 24 Juni 2011

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh,

Nama : Abdurahman Alatas  
NPM : 0706268165  
Departemen : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul Skripsi : Porositas Gas Paduan Duralumin Pada Pengecoran Sistem Vakum

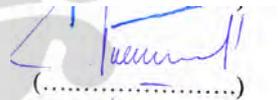
Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penugsi dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Departemen Teknik Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof. Dr.-Ing. Ir. Bambang Suharno



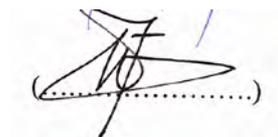
Penguji : Dr. Ir. Donanta Dhaneswara, M.Si



Penguji : Deni Ferdian, ST, M.Sc



Penguji : Dr. Ir. Wahyono Suprpto, MT.Met



Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 24 Juni 2011

## KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMA KASIH

Segala puji hanya bagi Allah Subhaanahu Wa Ta'ala yang telah memberikan BerkahNya. Sehingga atas Rahmat dan Karunia-Nya, saya dapat menyelesaikan penelitian untuk skripsi dan seluruh kegiatan perkuliahan di Program Sarjana Fakultas Teknik, Program Studi Teknik Metalurgi dan Material guna memperoleh gelar Sarjana Teknik. Empat tahun terasa begitu cepat, hingga akhirnya tiba saat terakhir dalam seluruh rangkaian pendidikan selama di Program Studi Teknik Metalurgi dan Material ini. Sungguh waktu berjalan begitu cepat, dan semua terasa indah berkat pengalaman selama di Departemen Metalurgi dan Material, Kuliah, Organisasi, dan Persahabatan membuat waktu 4 tahun perkuliahan sangatlah berarti dan tidak mungkin terlupakan. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada :

1. Prof. Dr –Ing. Ir Bambang Suharno sebagai Pembimbing I, serta Kepala Departemen Metalurgi dan Material yang telah memberikan motivasi serta masukan selama proses pengerjaan skripsi
2. Dr. Ir. Wahyono Suprpto, MT.Met sebagai Pembimbing II, yang telah banyak memberikan ilmu, serta bantuan dan motivasi selama proses penelitian.
3. Dr. Ir. Donanta Dhaneswara, M.Si sebagai Tim Penguji
4. Deni Ferdian, ST, M.Sc sebagai Tim Penguji
5. Prof. Dr. Ir Anne Zulfia, Msc sebagai Pembimbing Akademis yang telah memberikan bimbingan selama masa perkuliahan
6. Seluruh staf pengajar dan teknisi di Departemen Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia
7. Almarhum Aba saya yang telah mendidik dan membimbing saya dari kecil, walaupun Aba harus berpulang lebih cepat ke pangkuan Ilahi. Skripsi ini khusus saya dedikasikan untuk Aba
8. Mama yang telah mendidik dan membesarkan saya dengan kasih sayang hingga saat ini. Serta Hasan dan Ali, adik-adik saya yang menjadi motivasi saya selama proses perkuliahan
9. Rekan penelitian saya Reza Septian yang telah bersama-sama dari mulai menyusun proposal, proses pengecoran di malang, hingga sidang skripsi
10. Sahabat-sahabat saya selama masa perkuliahan: Reza, Atri, Arya, Benny, Adhi, Andika, dan Andra yang telah bersama-sama dalam suka dan duka
11. Seluruh teman-teman saya mahasiswa Metalurgi dan Material FTUI angkatan 2007, yang sangat luar biasa. (Solid, Tanggung Jawab, Cinta Jurusan)!!!

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

---

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

Nama : Abdurahman Alatas  
NPM : 0706268165  
Departemen : Metalurgi dan Material  
Fakultas : Teknik  
Jenis karya : Skripsi

demikian demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul : **“Porositas Gas Paduan Duralumin Pada Pengecoran Sistem Vakum”** beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada Tanggal : 24 Juni 2011

Yang Menyatakan



( Abdurahman Alatas )

## ABSTRAK

Nama : Abdurahman Alatas  
Program Studi : Metalurgi dan Material  
Judul : **Porositas Gas Paduan Duralumin Pada Pengecoran Sistem Vakum**

Logam duralumin yang merupakan paduan aluminium dengan tembaga maksimal 5.5% memiliki properti dan karakteristik yang sangat baik untuk digunakan sebagai komponen otomotif maupun pesawat terbang. Tetapi pada proses fabrikasinya, terutama dalam proses pengecoran, duralumin memiliki kendala berupa fluiditas yang buruk sehingga rentan terjadi cacat berupa porositas gas dan porositas penyusutan. Dalam penelitian kali ini, digunakan permodelan berupa perhitungan faktor-faktor yang menjadi penyebab porositas gas dan dibandingkan dengan hasil eksperimen, sehingga proses pengecoran dapat dibuat seefektif mungkin untuk menghasilkan produk hasil pengecoran yang memiliki porositas rendah. Analisis teoritis yang digunakan adalah perhitungan kecepatan tuang, jenis aliran, waktu solidifikasi total, serta laju pendinginan. Pengecoran dilakukan dengan proses pemvakuman dengan tekanan peleburan sebesar 40cmHg dan tekanan solidifikasi sebesar 30cmHg, cetakan yang digunakan terbuat dari baja karbon rendah dan dikondisikan dengan temperatur 300°C, variasi produk pengecoran yang digunakan adalah duralumin dengan kandungan Cu 2,5-4,5% dengan variasi ketebalan produk 5-15mm. Hasil eksperimen menunjukkan paduan duralumin dengan kandungan tembaga 4.5% memiliki jumlah kandungan porositas gas paling tinggi sebesar 12.5% dibanding duralumin dengan tembaga 2.5% yang memiliki porositas gas sebesar 10%, dan kuantitas porositas gas terjadi paling kecil pada produk dengan ketebalan 15mm dengan rata-rata porositas gas sebesar 8.5% dibanding duralumin dengan ketebalan 5mm dengan porositas gas sebesar 13%.

**Kata kunci** : Duralumin, Pengecoran Sistem Vakum, Porositas gas, Jenis Aliran, Laju Pendinginan

## ABSTRACT

Name : Abdurahman Alatas  
Study Program : Metallurgy and Material Engineering  
Title : Gas Porosity of Duralumin Alloys in Vacuum Casting System

Duralumin alloys which contain of aluminium and copper less than 5.5%, have a great material properties and characteristic which is very good to be applied to automotive parts and aeroplane industries. Duralumin alloys beside its great properties have a few problem, especially when it produce with casting process, it have less fluidity which make it very susceptible to gas and shrinkage porosity. This experiment using modeling to calculate the factors of gas porosity causes and makes comparison with actual result, so the casting process will be effective to produce best product with low content of gas porosity. Theoretical analysis that be used is calculation of pouring velocity, flow type, total solidification time, and cooling rate. Casting process will be using vacuum with 40cmHg melt pressure and 30cmHg solidification pressure, the mold will be made of low carbon steel with 300°C preheating, Variation that been used is duralumin alloys with 2.5-4.5% content of copper addition, with thickness variation from 5-15 mm. The result of this experiment shows that duralumin alloys with copper contain of 4.5 wt% have the highest quantity of gas porosity with 12.5% , compared to duralumin alloys with copper contain of 2.5 wt% with 10% gas porosity, and duralumin alloys with 15 mm thickness have less quantity of gas porosity with 8.5%, compared to duralumin alloys with 5mm thickness which have 13% of gas porosity.

**Keywords :** Duralumin Alloys, Vacuum Casting, Gas Porosity, Flow Type, Cooling Rate

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMA KASIH.....	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH.....	v
ABSTRAK.....	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
<b>1. PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1 LATAR BELAKANG.....	1
1.2 RUMUSAN MASALAH.....	2
1.3 TUJUAN PENELITIAN.....	2
1.4 RUANG LINGKUP PENELITIAN.....	3
1.5 SISTEMATIKA PENULISAN.....	3
<b>2. TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>5</b>
2.1 ALUMINIUM DAN PADUANNYA.....	5
2.2 DURALUMIN.....	7
2.2.1 Pengaruh Unsur Paduan Pada Duralumin.....	9
2.3 PENGECORAN.....	9
2.3.1 Pengecoran Sistem Vakum.....	10
2.4 SOLIDIFIKASI.....	11
2.5 CACAT POROSITAS.....	16
2.5.1 Porositas Gas.....	16
2.5.2 Porositas Penyusutan.....	17
2.6 METODE ANALITIK PERHITUNGAN POROSITAS.....	18
2.6.1 Prinsip Bernoulli.....	19
2.6.2 Metode Bilangan Reynold.....	20
2.6.3 Perhitungan Laju Pendinginan.....	21
<b>3. METODOLOGI PENELITIAN.....</b>	<b>23</b>
3.1 DIAGRAM ALIR PENELITIAN.....	23
3.2 PERALATAN DAN BAHAN.....	24
3.3 PROSEDUR PENELITIAN.....	25
3.3.1 Pengecoran Spesimen Menggunakan Tungku PSV.....	25
3.3.2 Persiapan Sampel.....	26
3.3.3 Pengujian Mikroskop Optik.....	27
3.3.4 Pengujian Densitas.....	28
<b>4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>29</b>
4.1 ANALISA PRODUK COR.....	29
4.2 ANALISA KECEPATAN PENUANGAN.....	34
4.3 ANALISA LAJU PENDINGINAN.....	36
4.4 ANALISA MIKROSTRUKTUR POROSITAS.....	40
4.5 ANALISA KUANTITAS POROSITAS.....	48

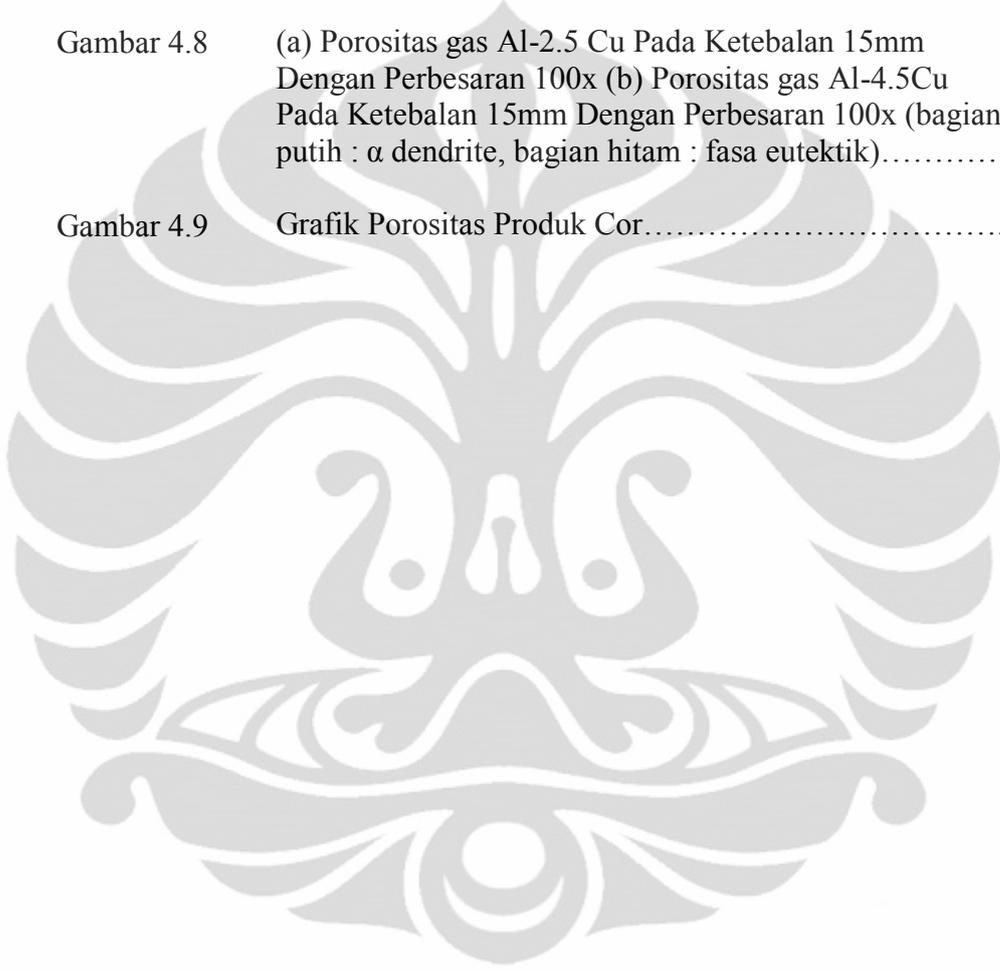
<b>5. KESIMPULAN.....</b>	<b>51</b>
<b>DAFTAR REFERENSI.....</b>	<b>52</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>56</b>



## DAFTAR GAMBAR

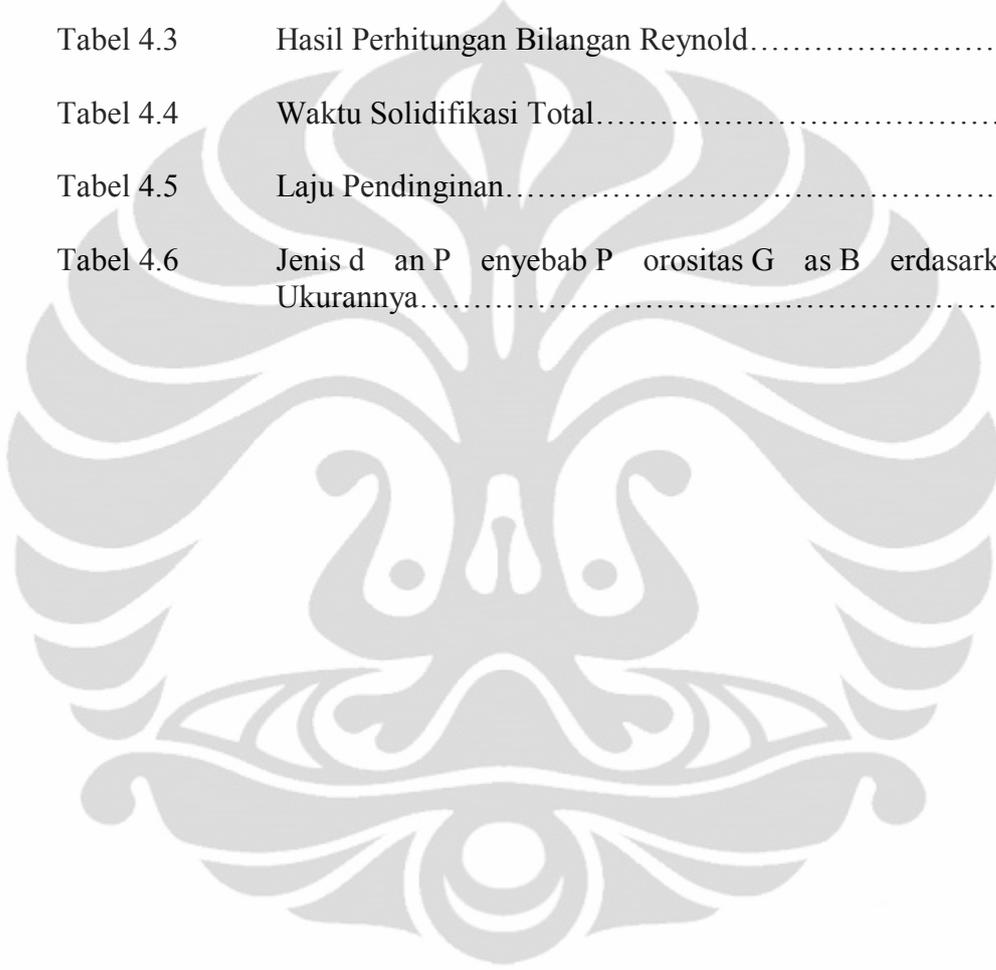
Gambar 2.1	Diagram Fasa Al-Cu.....	8
Gambar 2.2	Skema Pengecoran Sistem Vakum.....	11
Gambar 2.3	Kurva Pendinginan Pada Logam Murni.....	12
Gambar 2.4	Kurva Pendinginan Paduan Logam.....	13
Gambar 2.5	Skema Ilustrasi Solidifikasi Logam Dalam Cetakan Persegi.....	14
Gambar 2.6	Skema Ilustrasi dari tiga jenis dasar struktur tuang : (a) dendritik kolumnar, (b) dendritik sama sumbu, dan (c) sama sumbu nondendritik.....	15
Gambar 2.7	Skema Ilustrasi Struktur cor (a) fasa tunggal, dan (b) fasa ganda.....	15
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian.....	23
Gambar 3.2	Dapur Induksi (Pengecoran Sistem Vakum).....	25
Gambar 3.3	Cetakan permanen (baja karbon rendah).....	25
Gambar 3.4	Spesimen Duralumin Hasil Pengecoran (tampak samping).....	26
Gambar 3.5	Mikroskop Optik.....	28
Gambar 4.1	Spesimen Duralumin Hasil Pengecoran (tampak atas).....	30
Gambar 4.2	Produk Cor Ketebalan 5mm Setelah Dibelah Dua Bagian	32
Gambar 4.3	Produk Cor Ketebalan 15mm Setelah Dibelah Dua Bagian	32
Gambar 4.4	Produk Hasil Pengecoran Setelah di Pisahkan Dari <i>Gating System</i> .....	34
Gambar 4.5	Foto Mikro Porositas gas Al-2.5Cu Ketebalan 5mm Dengan Perbesaran 100x (bagian putih : $\alpha$ dendrit, bagian hitam : fasa eutektik).....	41

Gambar 4.6	Foto Mikro Porositas Penyusutan Al-2.5Cu Ketebalan 5mm Dengan Perbesaran 100x (bagian putih : $\alpha$ dendrit, bagian hitam : fasa eutektik).....	41
Gambar 4.7	(a) Porositas gas Al-3.5Cu Pada Ketebalan 5mm Dengan Perbesaran 100x (b) Porositas gas Al-3.5 Cu Pada Ketebalan 15mm Dengan Perbesaran 100x (bagian putih : $\alpha$ dendrit, bagian hitam : fasa eutektik).....	45
Gambar 4.8	(a) Porositas gas Al-2.5 Cu Pada Ketebalan 15mm Dengan Perbesaran 100x (b) Porositas gas Al-4.5Cu Pada Ketebalan 15mm Dengan Perbesaran 100x (bagian putih : $\alpha$ dendrite, bagian hitam : fasa eutektik).....	47
Gambar 4.9	Grafik Porositas Produk Cor.....	48



## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Sistem Penamaan Aluminium Tuang .....	6
Tabel 4.1	Unsur-unsur Dalam Logam Duralumin yang Dihasilkan..	29
Tabel 4.2	Hasil Perhitungan Kecepatan Aliran Duralumin Cair .....	35
Tabel 4.3	Hasil Perhitungan Bilangan Reynold.....	35
Tabel 4.4	Waktu Solidifikasi Total.....	37
Tabel 4.5	Laju Pendinginan.....	38
Tabel 4.6	Jenis dan Penyebab Porositas Gas Berdasarkan Ukurannya.....	42



## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Persentase Kandungan Unsur Hasil <i>Optical Emission Spectroscopy</i> .....	56
Lampiran 2	Data Properti Material Untuk Perhitungan Waktu Solidifikasi Total dan Dimensi Produk Hasil Pengecoran.	57
Lampiran 3	Data Konstanta Mold dan Waktu Solidifikasi Total.....	58
Lampiran 4	Data Hasil Perhitungan Kecepatan Aliran Logam Cair dan Data Hasil Perhitungan Bilangan Reynold.....	60
Lampiran 5	Data Hasil Pengujian Densitas Al-2.5Cu.....	61
Lampiran 6	Data Hasil Pengujian Densitas Al-3Cu.....	62
Lampiran 7	Data Hasil Pengujian Densitas Al-3.5Cu.....	63
Lampiran 8	Data Hasil Pengujian Densitas Al-4Cu.....	64
Lampiran 9	Data Hasil Pengujian Densitas Al-4.5Cu.....	65

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 LATAR BELAKANG

Industri fabrikasi paduan aluminium telah menjadi bagian penting pada pertumbuhan ekonomi global, dikarenakan dengan meningkatnya tingkat pemakaian Aluminium pada beberapa dekade terakhir. Dengan inovasi pada aluminium, serta harga aluminium yang lebih terjangkau dibandingkan jenis material manufaktur lain, industri aluminium memperkuat posisinya tidak hanya dalam bidang konstruksi, tetapi juga untuk keperluan komponen otomotif dan pesawat terbang<sup>[1,2]</sup>.

Aluminium memiliki potensial untuk menggantikan komponen-komponen yang biasanya memakai material *ferrous*, terutama pada aplikasi yang membutuhkan properti mekanis yang tinggi serta beban yang ringan, aluminium merupakan solusi yang paling tepat. Ditambah dengan kemungkinan memproduksi komponen dengan bentuk jadi atau setengah jadi membuat produksi aluminium membutuhkan biaya yang lebih murah, Penurunan properti mekanis dari aluminium biasanya terjadi akibat adanya cacat atau *inhomogeneities*, yang bisa menyebabkan terjadinya inisiasi cacat fatik. Pada saat ini, banyak penelitian yang menyelidiki pengaruh dari mikrostruktur dan porositas pada paduan aluminium<sup>[2,3,4,5]</sup>.

Salah satu paduan Aluminium yang menarik untuk diteliti adalah paduan Al-Cu (duralumin), duralumin memiliki karakteristik yang ringan, *strength-to-weight* ratio yang tinggi, ketahanan korosi yang tinggi, konduktivitas listrik yang baik, ketangguhan dan ketahanan fatik yang sangat tinggi, mampu diberi perlakuan panas dan mempunyai bentuk akhir mendekati bentuk as linya (*final near net ship*) sehingga proses pengerjaan *finishing* nya dapat diminimalisir. Hal ini yang menyebabkan duralumin banyak diaplikasikan pada industri pesawat terbang komersial, industri otomotif serta untuk komponen yang dipakai di luar angkasa<sup>[3,4,5]</sup>.

Tetapi paduan Al-Cu mempunyai rentang *feeding* panjang (waktu pengisian cetakan yang lama) sehingga sangat rentan dengan cacat penyusutan, *hot cracking* dan porositas. Kompleksitas bentuk dan dimensi seringkali menimbulkan cacat pengecoran (porositas) pada paduan aluminium dengan mampu tuang rendah seperti duralumin<sup>[3,4]</sup>. Aluminium dan tembaga dalam kondisi *liquid* maupun *solid* termasuk logam yang sangat mudah menyerap gas hidrogen dari lingkungan. Dengan semakin berkembangnya penggunaan material paduan Al-Cu pada industri otomotif maupun penerbangan komersial, maka kebutuhan terhadap komponen hasil pengecoran duralumin akan semakin meningkat. Namun karena paduan duralumin sangat rentan akan terjadinya porositas, maka sistem pengecoran yang dilakukan harus di perhitungkan secara baik dan seluruh komponen terkait harus di perhatikan dengan seksama.

Metode analitik merupakan metode edukatif yang di gunakan untuk memprediksi tingkat cacat porositas yang terjadi pada hasil produksi pengecoran tanpa harus melakukan eksperimen terlebih dahulu, hal ini membuat metode analitik merupakan metode yang murah dan cepat untuk meminimalisir cacat pada produk hasil pengecoran dibandingkan dengan melakukan eksperimen pengecoran secara langsung yang menggunakan biaya yang tinggi<sup>[5]</sup>.

## 1.2 RUMUSAN MASALAH

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah untuk mengetahui tingkat porositas gas yang terjadi pada paduan duralumin dengan menggunakan pengecoran sistem vakum, serta melakukan validasi dengan menggunakan perhitungan analitik untuk menghitung faktor-faktor penyebab porositas gas.

## 1.3. TUJUAN PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan :

- a. Memprediksi paduan duralumin yang paling efektif untuk proses pengecoran sistem vakum
- b. Mengamati proses solidifikasi, *Cooling rate*, dan *feeding rate*,
- c. Mengetahui pengaruh penambahan unsur Cu terhadap porositas gas yang terbentuk

- d. Mengamati pengaruh ketebalan produk terhadap porositas gas yang terjadi

#### 1.4. RUANG LINGKUP PENELITIAN

Dalam penelitian ini variabel tetap yang digunakan adalah:

1. Temperatur penuangan : 700° C
2. Temperatur *mold* : 300°C
3. Tekanan melting yang digunakan adalah : 40cmHg
4. *Mold* yang digunakan berbahan *low carbon steel*

Variabel yang berubah yaitu :

1. Material duralumin dengan %wt Cu sebesar 2.5%, 3%, 3.5%, 4%, 4.5%
2. Ketebalan cetakan sebesar 5 mm, 7.5 mm , 10 mm, 12.5 mm, 15 mm

Karakterisasi material yang dilakukan meliputi :

1. Uji *Optical Emission Spectroscopy* : pengujian ini dilakukan untuk memvalidasi unsur-unsur dalam logam cor yang akan diteliti
2. Uji metalografi : pengujian ini dilakukan untuk mendapatkan struktur mikro porositas dari produk cor hasil eksperimen dan untuk mendapatkan distribusi serta jenis porositas (dilihat dengan bantuan mikroskop optik)
3. Uji densitas : perhitungan kadar porositas produk cor hasil eksperimen menggunakan selisih perhitungan densitas teoritis dan eksperimen

#### 1.5. SISTEMATIKA PENULISAN

Dalam penyusunan penelitian ini, sistematika penulisan disusun secara berurutan sehingga didapatkan kerangka alur pemikiran yang mudah dan praktis. Sistematika tersebut dijabarkan dalam bentuk beberapa bab yang saling berkaitan satu sama lain, yaitu:

##### **Bab 1 : PENDAHULUAN**

Meliputi tentang latar belakang penelitian, perumusan masalah, tujuan penelitian, ruang lingkup penelitian, dan sistematika penulisan.

**Bab 2 : TINJAUAN PUSTAKA**

Meliputi tentang aluminium dan paduannya, literatur mengenai porositas, serta membahas mengenai metode analitik yang akan digunakan dalam memprediksi porositas.

**Bab 3 : METODOLOGI PENELITIAN**

Meliputi hal-hal yang dikerjakan selama penelitian berlangsung, meliputi diagram alir penelitian, alat, bahan, prosedur penelitian, dan pengujian-pengujian.

**Bab 4 : HASIL DAN PEMBAHASAN**

Meliputi hasil/data analisis bahasan hasil-hasil penelitian meliputi data hasil pengujian serta pembahasan hasil komparasi pada pengujian komposisi kimia, pengamatan struktur mikro dan perhitungan kuantitas porositas.

**Bab 5 : KESIMPULAN**

Bab ini berisikan tentang kesimpulan berupa pernyataan yang merupakan garis besar dari analisa hasil penelitian

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 ALUMINIUM DAN PADUANNYA

Aluminium adalah logam yang paling berlimpah, serta unsur ke-3 terbanyak di kulit bumi setelah oksigen dan silikon. Aluminium memiliki sifat yang sangat reaktif jika bertindak sebagai logam bebas. Bahkan aluminium ditemukan dalam kombinasi di hampir 270 mineral yang berbeda. Mineral utama yang menghasilkan aluminium adalah bauksit, yang merupakan gabungan dari *hydrated aluminium oxide* ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ ) dan *hydrated iron oxide* ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ )<sup>[2,6,7]</sup>.

Aluminium merupakan logam dengan karakteristik massa jenis yang relatif rendah (2,7 g/cm<sup>3</sup>), terletak pada golongan IIIA, dan memiliki nomor atom 13, memiliki konduktivitas listrik dan panas yang tinggi dan tahan terhadap serangan korosi di berbagai lingkungan, termasuk di temperatur ruang, memiliki struktur FCC (*face centered cubic*), tetap memiliki keuletan di kondisi temperatur rendah serta memiliki temperatur lebur 660° C. Aluminium adalah suatu logam yang secara termodinamika adalah logam yang reaktif

Paduan aluminium adalah jenis logam paduan yang memiliki komposisi aluminium terbesar atau dominan dibandingkan logam lainnya. Jenis unsur paduan yang biasa digunakan pada paduan aluminium adalah tembaga, magnesium, mangan, silikon, dan seng. Paduan aluminium pada dasarnya dibagi menjadi dua jenis, yaitu *casting alloys* dan *wrought alloys*, dan keduanya dibagi lagi menjadi dua jenis yaitu *heat-treatable* dan *non-heat-treatable*<sup>[7]</sup>. Berdasarkan sistem penamaan yang dikeluarkan oleh *Aluminium Association* (AA), kelas-kelas pada aluminium dibagi berdasarkan jenis paduan yang digunakan. Tata nama tersebut menggunakan 4 digit angka, yang diklasifikasikan seperti pada tabel 2.1 berikut

Tabel 2.1 Sistem Penamaan Aluminium Tuang<sup>[8]</sup>

Nomor Penamaan	Unsur Paduan Utama
1xx.x	Aluminium murni ( $\geq 99\%$ )
2xx.x	Paduan Al-Cu
3xx.x	Paduan Al-Si + Cu dan/atau Mg
4xx.x	Paduan Al-Si
5xx.x	Paduan Al-Mg
6xx.x	Tidak digunakan
7xx.x	Paduan Al-Zn
8xx.x	Paduan Al-Sn
9xx.x	Paduan Al-Unsur lainnya

Sekitar 85% dari aluminium digunakan untuk *wrought products* seperti produk lembaran, hasil ekstrusi atau dalam bentuk *foil*. Paduan aluminium *cast* memiliki harga produksi yang lebih murah dikarenakan memiliki titik lebur yang rendah, walaupun biasanya memiliki kekuatan tarik yang lebih rendah jika dibandingkan dengan paduan aluminium *wrought*. Paduan aluminium sangat banyak digunakan pada rekayasa struktur dan komponen di mana dibutuhkan massa yang ringan serta ketahanan korosi yang tinggi<sup>[7]</sup>. Penggunaan paduan aluminium untuk sebuah keperluan spesifik biasanya didasarkan pada pertimbangan faktor kekuatan tarik, berat jenis, ke lenturan, kemampuan sambung, serta ketahanan korosi. Paduan aluminium banyak digunakan dalam komponen pesawat terbang dikarenakan memiliki *strength-to-weight ratio* yang tinggi<sup>[9]</sup>. Di lain sisi, aluminium murni tidak dapat digunakan dalam komponen-komponen tersebut dikarenakan memiliki sifat yang terlalu lunak, dan kekuatan tarik yang sangat rendah. Adapun beberapa karakteristik aluminium adalah<sup>[10]</sup> :

1. Fluiditas yang baik, sehingga mampu mengisi rongga-rongga cetakan yang tipis.
2. Temperatur lebur dan tuang yang rendah dibandingkan dengan material lain sehingga energi pemanasan dapat diminimalkan.
3. Siklus pengeuanan yang cukup cepat, dikarenakan perpindahan panas (konduktivitas panas) dari aluminium cair ke cetakan relatif cepat jadi produktivitas dapat ditingkatkan.
4. Kelarutan gas hidrogen dalam aluminium dapat dikontrol dengan proses yang baik.
5. Banyak jenis aluminium paduan yang relatif bebas dari kecenderungan terjadinya keretakan akibat *hot shortness*.
6. Memiliki stabilitas kimia yang relatif baik
7. Memiliki permukaan *as-cast* yang baik, berkilat, dan tanpa noda.

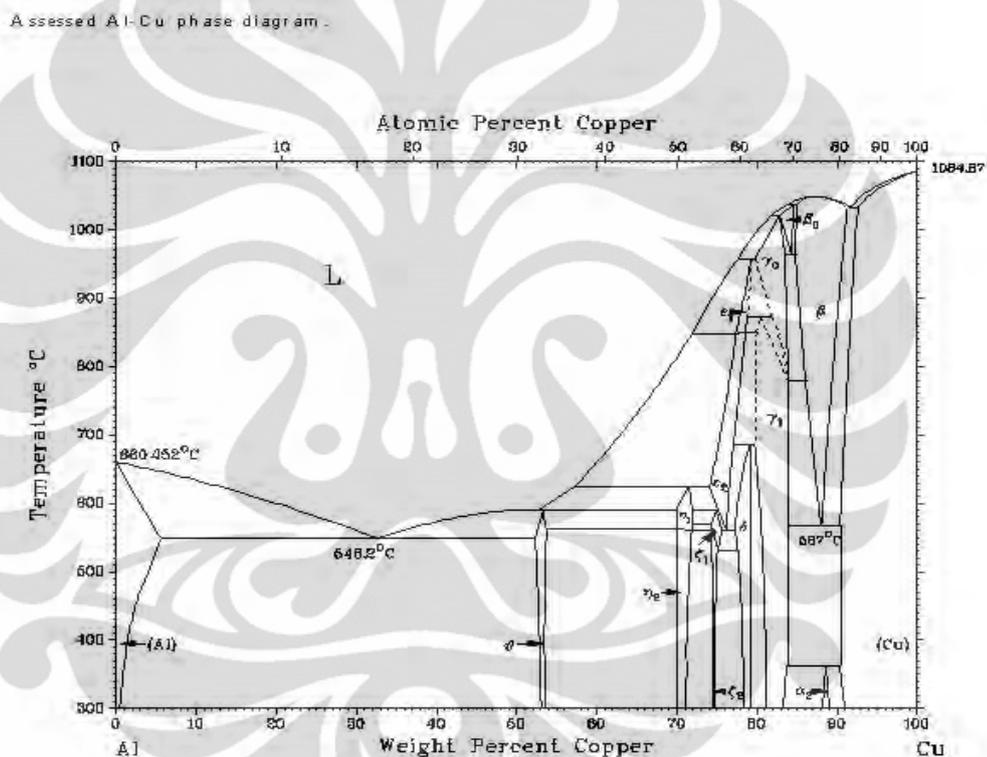
## 2.2 DURALUMIN

Duralumin (juga disebut duraluminium, duraluminium, atau dural) adalah nama dagang dari salah satu tipe paduan aluminium yang memiliki kemampuan penguatan menggunakan metode *age-hardening*. Duralumin yang biasa digunakan pada saat ini adalah tipe AA2024, yang memiliki kandungan 4.4% tembaga, 1.5% magnesium, 0.6% mangan, dan 93.5% aluminium. Memiliki *yield strength* dikisaran 450MPa, dengan variasi tergantung dari jumlah komposisi dan temper<sup>[9]</sup>.

Duralumin dikembangkan oleh seorang *metallurgist* asal Jerman, Alfred Wilm di *Dürener Metallwerke Aktien Gesellschaft* pada tahun 1903, Wilm menemukan bahwa setelah proses *quenching*, paduan aluminium yang memiliki kandungan 4% tembaga akan mengeras secara perlahan jika didiamkan pada temperatur ruang selama beberapa hari. Penelitian selanjutnya berujung pada pengenalan terhadap duralumin pada tahun 1909<sup>[11]</sup>. Nama duralumin biasa digunakan untuk mendeskripsikan paduan Al-Cu, atau aluminium seri 2000 yang didesain oleh International Alloy Designation System (IADS) pada tahun 1970 oleh Aluminum Association.

Duralumin memiliki karakteristik yang ringan, *strength-to-weight* ratio yang tinggi, ketahanan korosi yang tinggi, konduktivitas listrik yang baik, ketangguhan dan ketahanan fatik yang sangat tinggi, mampu diberi perlakuan panas dan mempunyai bentuk akhir mendekati bentuk aslinya (*final near net shape*) sehingga proses pengerjaan *finishing* nya dapat diminimalisir<sup>[3]</sup>. Akan tetapi material duralumin memiliki *castability* yang rendah sehingga tingkat produktivitas pengecoran dengan bentuk-bentuk kompleks menjadi berkurang<sup>[4]</sup>.

Diagram fasa paduan Al-Cu dapat dilihat pada gambar 2.1 dibawah ini :



Gambar 2.1 Diagram fasa Al-Cu<sup>[10]</sup>

Dari diagram fasa diatas dapat dilihat fasa-fasa yang terbentuk tergantung dari temperature dan % kandungan dari unsur Al dan Cu pada logam paduan, dalam hal paduan Al-Cu dimana Al bertindak sebagai logam dominan, secara garis besar dibagi menjadi 3 bagian, yaitu komposisi hipoeutektik, komposisi eutektik, dan komposisi hipereutektik<sup>[12]</sup>.

### 2.2.1. PENGARUH UNSUR PADUAN PADA DURALUMIN

Duralumin biasanya terdiri dari unsur aluminium, tembaga, magnesium, dan mangan. Penambahan unsur tersebut biasanya akan mempengaruhi kekuatan mekanis serta properti dari duralumin itu sendiri. Oleh karena itu biasanya presentase masing-masing unsur di kontrol untuk mendapatkan properti yang paling sesuai untuk aplikasi yang akan digunakan.

#### a. Tembaga

Penambahan tembaga pada duralumin akan mengakibatkan meningkatnya *strength-to-weight* ratio logam, serta meningkatkan *machinability* paduan karena kekuatan matrix yang meningkat. Namun seiring dengan penambahan tembaga pada paduan aluminium, ketahanan korosi dari material akan berkurang, fluiditas logam juga menjadi rendah dan mudah mengalami *hot-tear*<sup>[13]</sup>.

#### b. Magnesium

Penambahan magnesium pada duralumin akan mengakibatkan peningkatan kekuatan dan kekerasan logam karena akan terjadi *precipitation hardening phase* yaitu  $Al_2CuMg$  yang akan meningkatkan kekuatan logam. Namun memiliki dampak berkurangnya kelenturan dan ketahanan impak<sup>[13]</sup>.

#### c. Mangan

Penambahan mangan pada duralumin akan berfungsi untuk menstabilkan duralumin pada temperature servis yang tinggi. Mangan akan mengendalikan pertumbuhan butir pada duralumin<sup>[13]</sup>.

## 2.3 PENGECORAN

Pengecoran adalah salah satu proses manufaktur dimana logam cair biasanya dituangkan ke dalam cetakan, yang berbentuk rongga sesuai bentuk hasil akhir yang diinginkan, lalu dibiarkan untuk membeku. Logam yang telah mengalami solidifikasi lalu dikeluarkan dari cetakan dengan cara mengeluarkan produk atau menghancurkan cetakan. Proses pengecoran biasanya dilakukan untuk menghasilkan produk yang memiliki bentuk kompleks yang mengakibatkan membutuhkan biaya yang sangat tinggi untuk dibuat dengan metode lain<sup>[14]</sup>

Proses pengecoran dibagi menjadi dua jenis yang utama, yaitu *expendable* dan *non-expendable*. Pembagian tersebut didasarkan pada jenis material cetakan seperti pasir atau logam, serta metode penuangan seperti grafitasi, vakum, atau tekanan rendah<sup>[14]</sup>

### 2.3.1 PENGECORAN SISTEM VAKUM

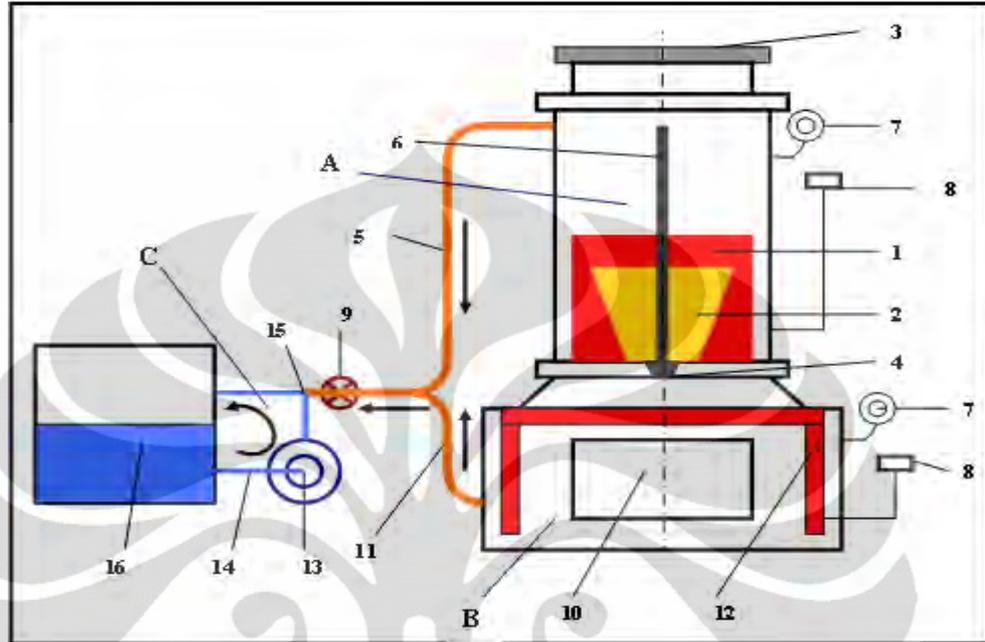
Pengecoran sistem vakum (PSV) dirancang untuk mengurangi cacat pengecoran yang disebabkan oleh porositas gas khususnya pada pengecoran paduan aluminium. Pada proses PSV, gas yang terlarut dalam logam cair akan diminimalisir dan kemurnian dari logam cair akan semakin baik. Proses PSV dapat dilakukan pada proses pengecoran benda berbentuk tipis dan memberikan hasil permukaan yang baik. Properti mekanik dari hasil proses PSV biasanya lebih tinggi 10-15% dibandingkan dengan pengecoran dengan sistem *gravity casting*<sup>[14]</sup>.

Di dalam PSV ini terdapat tiga komponen utama yaitu ;

- A). Ruang peleburan yang terdiri dari
  - 1). selongsong keramik dan elemen pemanas listrik,
  - 2). mangkok peleburan (*crusible*),
  - 3). lubang masuk bahan-baku,
  - 4). lubang *tapping*,
  - 5). saluran pipa vakum,
  - 6). batang *tapp* otomatis,
  - 7). instrumen tekanan,
  - 8). regulator pemanas,
  - 9). Katup udara
  - 10). *stop valve*.
- B). Ruang solidifikasi terdiri dari cetakan produk (spesimen),
  - 1). lubang masuk-keluar cetakan,
  - 2). saluran pipa vakum,
  - 3). elemen pemanas listrik,
- C). Komponen vakum terdiri dari
  - 1). pompa air,
  - 2). pipa saluran air,

- 3). *nozle* dan pipa kapiler,
- 4). reservoir air.

Skema konstruksi dan nomor bagian PSV dapat dilihat pada Gambar 2.2,



Gambar 2.2 Skema Pengecoran Sistem Vakum<sup>[32]</sup>

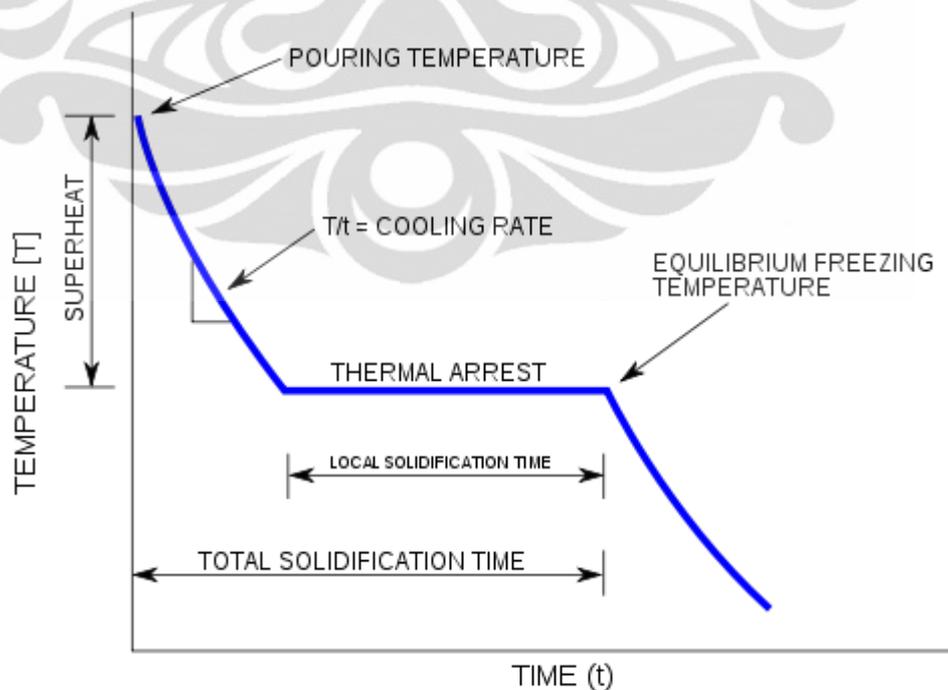
## 2.4. SOLIDIFIKASI

Solidifikasi adalah proses perubahan fasa dari fasa *liquid* menuju fasa *solid* yang terjadi pada proses pengecoran, sebagian besar cacat yang terjadi pada proses pengecoran dihasilkan pada saat solidifikasi yaitu cacat porositas gas dan cacat penyusutan<sup>[14]</sup>. Proses solidifikasi terjadi dalam dua tahapan, yaitu nukleasi dan pertumbuhan kristal. Pada tahap nukleasi, partikel solid terbentuk dari cairan. Ketika partikel solid terbentuk, energi yang dimiliki lebih rendah dibandingkan energi dari cairan di sekitarnya, yang akan menimbulkan energi antarmuka antar keduanya. Pembentukan permukaan antarmuka membutuhkan energi, jadi pada saat proses nukleasi terjadi material berada pada proses *undercools*, yang merupakan proses pendinginan di bawah temperature pembekuan, dikarenakan energi lebih yang dibutuhkan untuk membentuk permukaan antarmuka<sup>[14]</sup>.

Setelah proses nukleasi, maka temperature material akan mencapai temperature pembekuan kembali (*recalences*) untuk proses pertumbuhan kristal. Proses nukleasi terjadi pada permukaan padatan yang sudah ada

sebelumnya, karena tidak terlalu banyak energi yang dibutuhkan untuk permukaan antarmuka yang sebagian, dibandingkan pada permukaan antarmuka yang berbentuk *complete spherical*. Hal ini bisa menjadi keuntungan dikarenakan pertumbuhan butir yang halus pada proses pengecoran memiliki properti yang lebih baik dibandingkan butir yang kasar. Bentuk butir yang halus dapat diperoleh dengan menggunakan tambahan *grain refinement* atau inokulasi, yang merupakan penambahan *impurities* untuk memancing terjadinya nukleasi<sup>[14]</sup>. Semua proses nukleasi merepresentasikan sebuah kristal, dimana kristal bertumbuh ketika panas diberikan kepada fasa *liquid* hingga tidak ada lagi fasa *liquid*. Arah, laju, serta jenis pertumbuhan kristal dapat di kontrol untuk mengoptimalkan properti dari produk pengecoran<sup>[14]</sup>.

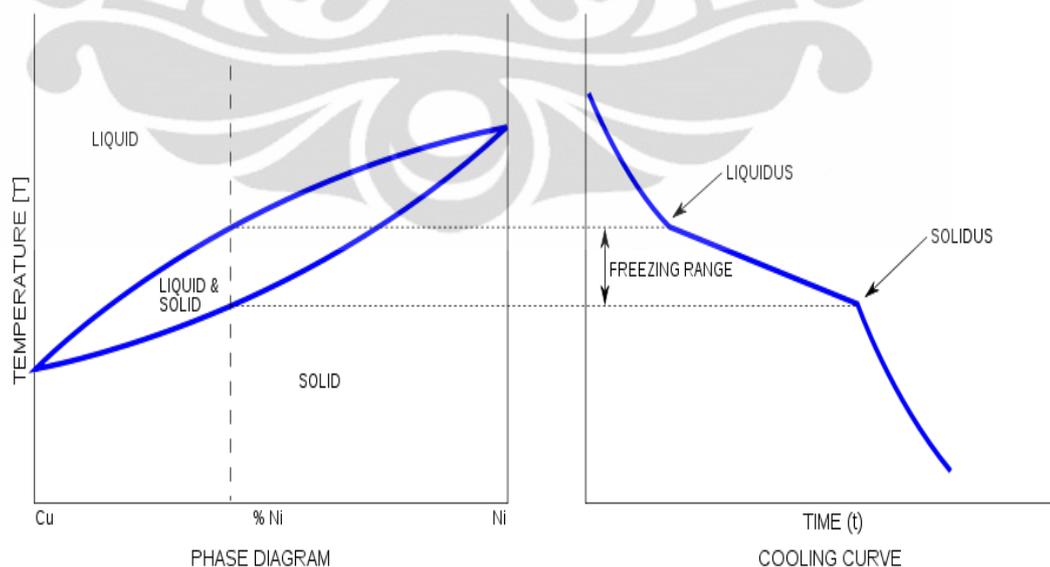
Kurva pendinginan adalah faktor penting dalam mengontrol kualitas produk hasil pengecoran, bagian terpenting dari kurva pendinginan adalah laju pendinginan yang akan mempengaruhi mikrostruktur dan properti material. Area pada material yang membeku dengan cepat akan memiliki struktur butir yang lebih halus jika dibandingkan dengan area pada material yang membeku perlahan<sup>[14]</sup>. Di bawah ini adalah contoh kurva pendinginan dari logam murni (tanpa unsur paduan)



**Gambar 2.3** Kurva pendinginan pada logam murni<sup>[14]</sup>

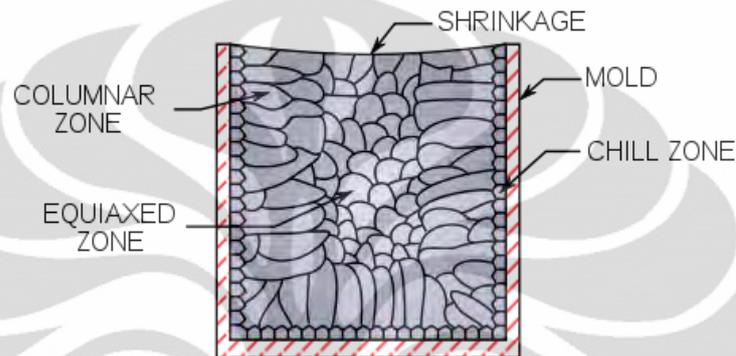
Pada gambar 2.3 dapat kita lihat bahwa sebelum *thermal arrest* material berada pada fasa *liquid*, sedangkan pada saat *thermal arrest* material berubah dari fasa *liquid* menjadi *solid*, semakin tinggi daerah *superheat* maka semakin lama waktu material untuk mengisi bentuk-bentuk yang detail pada cetakan. Laju pendinginan akan dikendalikan oleh jenis material cetakan, ketika logam cair dituang ke dalam cetakan, proses pendinginan dimulai. Hal ini terjadi karena panas yang terkandung dalam logam cair akan mengalir menuju bagian lebih dingin pada cetakan. Material cetakan menghantarkan panas dari produk menuju cetakan dengan laju yang berbeda-beda. Seperti cetakan logam akan menghantarkan panas dengan cepat, sedangkan cetakan pasir akan menghantarkan panas dengan lebih lambat.

Pada bagian cetakan yang diharuskan untuk menghantarkan panas dengan cepat, biasanya cetakan akan ditambahkan *chill* yang berfungsi untuk menyerap panas pada bagian tersebut. Sedangkan pada bagian yang harus menghantarkan panas dengan perlahan maka biasanya cetakan akan ditambahkan *riser* atau *padding*<sup>[14]</sup>. Pada gambar 2.3 di atas menunjukkan kurva pendinginan pada logam murni, namun pada kenyataannya kebanyakan logam yang dipakai dalam proses pengecoran berupa paduan, yang memiliki kurva pendinginan seperti yang ditunjukkan oleh kurva pendinginan paduan Cu-Ni pada gambar 2.4 dibawah.



**Gambar 2.4** Kurva pendinginan paduan logam<sup>[14]</sup>

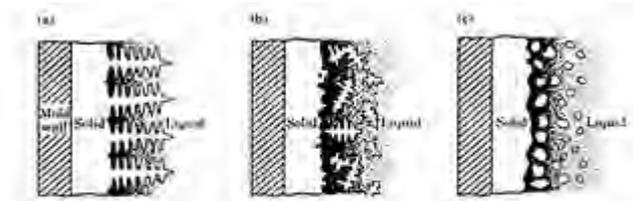
.Dapat dilihat pada gambar 2.4 bahwa kurva pendinginan tidak memiliki *thermal arrest* melainkan pada gambar tersebut terdapat *freezing range*, yang menunjukkan bagian *liquidus* dan *solidus* yang terdapat pada diagram fasa dari masing-masing paduan logam. Pertumbuhan butir pada saat proses solidifikasi, pada dasarnya memiliki tiga zona atau daerah yang berbeda, yaitu zona *chill*, zona *columnar*, dan zona *equiaxed*.



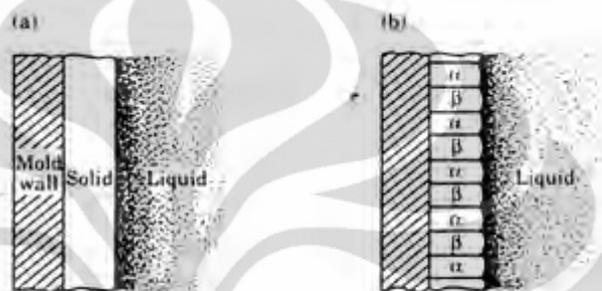
**Gambar 2.5.** Skema Ilustrasi solidifikasi logam dalam cetakan persegi<sup>[33]</sup>

Pada gambar 2.5 terlihat adanya tiga zona pada logam yang memiliki perbedaan bentuk butir yang terjadi, zona *chill* merupakan daerah solidifikasi yang terjadi pada permukaan cetakan dikarenakan panas yang terdapat pada produk diserap dengan cepat oleh cetakan, lalu semakin ke arah tengah cetakan, maka terbentuk zona *columnar*, zona ini berbentuk ramping, dan panjang mengarah ke pusat cetakan yang memiliki temperatur yang masih tinggi.

Zona *columnar* pada proses pengecoran biasanya dihindari karena bersifat anisotropi. Pada bagian tengah produk, terdapat zona *equiaxed* yang berbentuk *spherical* dan berukuran lebih besar dibandingkan pada zona *chill*, zona ini diharapkan terbentuk pada proses pengecoran dikarenakan memiliki sifat isotropi. Zona *equiaxed* dapat diperluas dengan cara menurunkan temperatur tuang, mengurangi inklusi, atau menggunakan *grain refinement*<sup>[14]</sup>. Karena semua proses pengecoran diharapkan memiliki sifat tertentu untuk memenuhi persyaratan desain dan kebutuhan, hubungan antara sifat dan struktur yang dikembangkan selama solidifikasi merupakan aspek dari pengecoran itu sendiri. Hubungan dalam hal morfologi dan konsentrasi paduan elemen di berbagai daerah dalam logam bisa dilihat di gambar 2.6 dan 2.7



**Gambar 2.6** Skema ilustrasi dari tiga jenis dasar struktur tuang: (a) dendritik kolomnar; (b) dendritik sama-sumbu, dan (c) sama-sumbu nondendritik<sup>[15]</sup>



**Gambar 2.7** Skema ilustrasi struktur cor (a) fasa tunggal, dan (b) dua fasa<sup>[15]</sup>

Komposisi dendrit dari logam cair diberikan oleh diagram fasa dari paduan tertentu. Ketika paduan didinginkan sangat lambat, setiap dendrit mengembangkan komposisi yang seragam. Namun, *normal under* (lebih cepat) pendingin ditemui dalam praktik, dendrit terbentuk dan memiliki komposisi permukaan yang berbeda dari yang di tengah (gradien konsentrasi). Permukaan memiliki konsentrasi yang lebih tinggi dari paduan sisa elemen dari pada inti dendrit karena penolakan terlarut dari inti ke permukaan selama pembekuan dari dendrit yang disebut *microsegregation*. Dengan *shading* gelap dalam cairan *interdendritic* dekat akar dendrit pada gambar 2.7, menunjukkan bahwa wilayah tersebut memiliki konsentrasi zat terlarut lebih tinggi. Jadi *microsegregation* di wilayah ini jauh lebih jelas daripada di tempat lain<sup>[15]</sup>.

Pada saat solidifikasi, kontraksi volume terjadi secara bersamaan pada daerah antarmuka fasa *liquid* dan *solid* dimana hidrogen dikeluarkan. Penyusutan ini menghasilkan perbedaan tekanan pada proses pengecoran, aliran logam terjadi akibat perbedaan tekanan ini. Pada saat proses ini, logam cair harus melewati

jaringan *semi-rigid dendritic* untuk menghilangkan penyusutan. Jaringan *dendritic* terbentuk pada awal mula proses solidifikasi pada struktur *equiaxed*<sup>[16,17,18]</sup>.

## 2.5. CACAT POROSITAS

Porositas adalah suatu cacat (*void*) pada produk cor yang dapat menurunkan kualitas benda tuang. Salah satu penyebab terjadinya porositas pada penuangan adalah gas hidrogen<sup>[19]</sup>. Porositas menjadi masalah yang paling utama dan menjadi penyebab komplain utama para pengguna produk pengecoran. Porositas menimbulkan pengaruh langsung terhadap kualitas dan ketahanan barang hasil pengecoran. Mengontrol porositas bergantung pada ke-pahaman terhadap sumber dan penyebab porositas itu sendiri. Peningkatan terhadap kualitas produk, performa komponen dan desain yang sesuai dapat dicapai jika porositas pada hasil pengecoran dapat di control atau bahkan ditiadakan<sup>[34]</sup>.

Cacat porositas yang terjadi pada pengecoran cetakan pasir antara lain disebabkan temperatur tuang terlalu tinggi, kontrol kurang sempurna terhadap absorpsi gas oleh paduan, pengeluaran gas dari dalam logam karena interaksi gas dengan logam selama peleburan dan penuangan. Jumlah gas yang terserap atau ikut larut bersama cairan logam bergantung pada jenis material yang dileburkan. Aluminium merupakan jenis logam yang kemampuan melarutkan hidrogennya cukup tinggi<sup>[20]</sup>.

### 2.5.1. POROSITAS GAS

Porositas gas adalah cacat yang diakibatkan pembentukan gelembung udara pada proses pengecoran pada saat didinginkan. Hal ini terjadi dikarenakan kebanyakan logam cair dapat menyimpan gas terlarut dalam jumlah besar, tetapi ketika dalam bentuk padatan logam tidak bisa menyimpan banyak gas terlarut, maka gelembung gas akan terperangkap di dalam logam hasil pengecoran<sup>[14]</sup>.

Porositas gas dapat terbentuk pada permukaan produk pengecoran sebagai porositas atau terperangkap di dalam logam produk pengecoran<sup>[21]</sup>. Hal ini dapat menyebabkan meningkatnya resiko terjadinya *stress corrosion*. Nitrogen, oksigen, dan hidrogen adalah gas yang paling banyak menjadi penyebab pada kasus porositas gas<sup>[22]</sup>.

Pada pengecoran logam aluminium, hidrogen adalah satu-satunya gas yang dapat terlarut dalam skala besar, yang dapat menyebabkan *hydrogen gas porosity*<sup>[23]</sup>. Pada pengecoran dalam skala beberapa kilogram, biasanya ukuran diameter porositas berkisar antara 0.01 sampai 0.5 mm. Namun pada pengecoran berskala yang lebih besar, porositas bisa mencapai diameter 1 mm<sup>[21]</sup>. Untuk menghindari porositas gas, material dapat dicairkan dalam keadaan vakum, dalam lingkungan dengan *low-solubility gases*, seperti argon atau karbon dioksida, atau dengan menggunakan flux yang mencegah permukaan logam bersentuhan langsung dengan udara. Untuk mengurangi kelarutan gas pada logam, *temperature superheat* dapat ditahan pada kondisi rendah<sup>[14]</sup>.

Turbulensi yang timbul ketika logam dituangkan ke dalam cetakan juga dapat menyebabkan gas terperangkap dalam logam, maka biasanya cetakan didesain untuk meminimalisir turbulensi. Metode lainnya seperti *vacuum degassing*, *gas flushing*, dan presipitasi. Metode presipitasi menggunakan reaksi antara gas dengan elemen lainnya sehingga membuat gas menyatu dan mengapung ke atas permukaan logam, contohnya oksigen dapat dikeluarkan dari tembaga dengan cara menambahkan fosfor, atau aluminium atau silikon dapat ditambahkan ke dalam baja untuk mengeluarkan oksigen<sup>[14]</sup>. Hidrogen biasanya tercipta akibat reaksi logam pada lingkungan yang memiliki tingkat kelembaban yang tinggi, atau cetakan yang lembab. Mengeringkan cetakan sebelum proses pengecoran dapat mengeliminasi hidrogen pada cetakan.

Gelembung gas dalam bentuk kecil disebut porositas, namun gelembung gas yang memiliki skala lebih besar biasa disebut *blowholes* atau *blisters*. Cacat seperti ini biasa terjadi karena gas terbawa ke dalam logam cair, asap dan uap air pada pengecoran dengan cetakan pasir, atau gas lainnya dari logam cair atau cetakan. Dengan rekayasa desain cetakan, dan reparasi logam cair yang baik dapat mengurangi kemungkinan terjadinya *blowholes*<sup>[24]</sup>.

### 2.5.2. POROSITAS PENYUSUTAN

Cacat penyusutan terjadi jika logam cair yang dituang, tidak mampu mengkompensasi penyusutan yang terjadi pada logam ketika metal mengalami proses solidifikasi. Cacat penyusutan dapat dibagi menjadi dua jenis, yaitu cacat

penyusutan terbuka dan cacat penyusutan tertutup. Cacat penyusutan terbuka bersentuhan langsung dengan atmosfer, jadi ketika penyusutan terjadi maka udara akan mengisi daerah tempat terjadinya penyusutan tersebut. Terdapat dua tipe dari cacat penyusutan terbuka, *pipes* dan *caved surfaces*. *Pipes* terbentuk di daerah permukaan dan membentuk lubang ke dalam produk, sedangkan *caved* terbentuk sepanjang permukaan produk tetapi lebih dangkal dibandingkan *pipes*<sup>[25]</sup>.

Cacat penyusutan tertutup, atau yang biasa disebut dengan porositas penyusutan, adalah cacat yang terbentuk selama proses pengecoran. Daerah cairan logam yang terisolasi terbentuk di dalam logam yang membeku, yang dinamakan daerah *hot spots*. Porositas penyusutan membutuhkan titik nukleasi, jadi *impurities* dan gas terlarut dapat membentuk cacat penyusutan tertutup. Cacat penyusutan dibagi menjadi *macroporosity* dan *microporosity* (atau *microshrinkage*), dimana *macroporosity* dapat dilihat tanpa bantuan alat optik, sedangkan *microporosity* tidak bisa<sup>[22-25]</sup>.

## 2.6 METODE ANALITIK PERHITUNGAN POROSITAS

Memprediksi cacat porositas yang akan terjadi pada proses pengecoran dapat menjadi sebuah kemajuan dalam proses manufaktur, dengan memprediksikan porositas yang akan terjadi, maka faktor-faktor yang mengakibatkan cacat bisa dikurangi sebelum melakukan proses, yang akan mengurangi biaya yang harus dilakukan untuk melakukan eksperimen pengecoran sebenarnya<sup>[26]</sup>.

Perhitungan matematik untuk memprediksi faktor-faktor penyebab porositas dari proses pengecoran adalah proses yang simpel, efektif, dan murah dalam melakukan control proses, dan *quality assurance* pada pengecoran<sup>[13]</sup>. Hal ini membuat tidak perlunya diadakan percobaan yang memakan waktu dan biaya yang tinggi. Aspek makroskopis dan mikroskopis dari proses solidifikasi perlu diketahui untuk mendapatkan deskripsi lengkap dari proses pengecoran yang dilakukan<sup>[27]</sup>. Data makroskopis dibutuhkan untuk menspesifikasi berbagai fenomena transportasi yang terjadi pada saat produksi pengecoran. Sedangkan data mikroskopis dibutuhkan untuk mendapatkan data tentang evolusi mikrostruktur yang terjadi pada saat solidifikasi<sup>[5]</sup>.

Pada beberapa dekade terakhir, berbagai pengamatan data makroskopis telah dikembangkan untuk memprediksi aliran logam cair<sup>[28,29]</sup> dan aliran panas<sup>[30,31]</sup> pada pengecoran. Data makroskopis telah digunakan untuk menjelaskan pola aliran di pengecoran benda dengan bentuk rumit dan mengetahui desain riser yang optimum dengan melakukan estimasi terhadap pola penyusutan<sup>[5]</sup>. Pada saat ini, pengamatan data mikroskopis telah dikembangkan untuk menjelaskan tentang evolusi mikrostruktur dan *interdendritic fluid flow* pada saat solidifikasi. Data mikroskopis membuat kita bisa untuk memprediksi parameter mikrostruktur seperti ukuran butir, *secondary dendrite arm spacing* (DAS), dan *eutectic spacing*. Hasil pengamatan tersebut dapat menghasilkan data kuantitatif dari distribusi *microporosity* pada pengecoran<sup>[5]</sup>.

### 2.6.1 PRINSIP BERNOULLI

Dalam ilmu mekanika fluida, prinsip Bernoulli menyatakan bahwa dalam sebuah aliran fluida, meningkatnya kecepatan aliran fluida terjadi bersamaan dengan menurunnya tekanan atau menurunnya energi potensial fluida<sup>[42,43]</sup>. Prinsip Bernoulli bisa diaplikasikan ke dalam berbagai macam jenis aliran, yang menghasilkan persamaan Bernoulli. Prinsip Bernoulli dapat dijabarkan dari prinsip konservasi energi. Yang menyatakan bahwa, dalam aliran stabil, jumlah energi mekanis dalam aliran sepanjang sebuah area adalah sama untuk tiap bagian area tersebut<sup>[44]</sup>. Peningkatan kecepatan aliran fluida terjadi secara proporsional dengan peningkatan tekanan dinamis dan energi kinetik, serta penurunan dari tekanan statik dan energi potensial. Partikel fluida adalah subjek dari tekanan dan tinggi aliran tersebut. Jika sebuah fluida mengalir secara horisontal dimana kecepatannya meningkat, hal ini hanya bisa terjadi jika fluida tersebut mengalir dari daerah bertekanan rendah menuju daerah bertekanan tinggi<sup>[43]</sup>.

Persamaan Bernoulli yang akan digunakan untuk mencari kecepatan aliran fluida dalam metode analitik perhitungan porositas terlihat pada persamaan (2.1) dimana energi total selalu berupa hasil penambahan energi potensial sistem, energi kecepatan sistem, dan energi tekanan sistem<sup>[43]</sup>.

$$H = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} \quad (2.1)$$

Dari turunan dasar Bernoulli pada persamaan 2.1 dapat diturunkan sehingga kecepatan penyaluran pada sistem dapat dikalkulasikan dengan menggunakan persamaan 2.2, di mana kecepatan tuang pada proses pengecoran bergantung terhadap faktor-faktor tekanan ( $P$ ), densitas ( $\rho$ ), faktor percepatan gravitasi ( $g$ ), dan tinggi penuangan ( $h$ ) pada proses pengecoran.

$$V = \sqrt{2\left(\frac{\Delta P}{\rho} + gh\right)} \quad (2.2)$$

### 2.6.2 METODE BILANGAN REYNOLD

Dalam mekanika fluida, bilangan Reynold ( $Re$ ) adalah sebuah bilangan tanpa dimensi yang memberikan sebuah rasio ukuran dari gaya inersia terhadap viskositas, dan secara konvensional menjelaskan hubungan penting antara kedua gaya tersebut terhadap kondisi aliran. Konsep ini diperkenalkan oleh George Gabriel Stokes pada tahun 1851<sup>[35]</sup> tetapi bilangan Reynold dinamakan atas nama Osborne Reynolds (1842-1912), yang mempopulerkan penggunaannya pada tahun 1883<sup>[36,37]</sup>

Bilangan Reynold sering digunakan ketika melakukan analisis dimensi terhadap permasalahan aliran fluida dinamis. Bilangan Reynold juga digunakan untuk mengklasifikasi jenis aliran, apakah aliran yang timbul adalah aliran laminar atau aliran turbulen<sup>[35]</sup>. Aliran laminar terjadi ketika bilangan Reynold yang dihasilkan kecil, ketika gaya dari viskositas dominan, dan menghasilkan aliran yang lancar dan gerakan fluida yang konstan. Sedangkan aliran turbulen terjadi pada bilangan Reynold yang besar, dimana fluida didominasi oleh tekanan inersia, yang mengakibatkan aliran bersifat *chaos* dan tidak stabil<sup>[36]</sup>. Pada tahun 1883, Osborne Reynolds melakukan eksperimen dengan aliran fluida dan turbulensi. Dia menemukan bahwa ketika fluida melewati sebuah objek, aliran berubah dari laminar menjadi turbulen pada kecepatan yang sangat spesifik. Kecepatan tersebut bergantung pada beberapa faktor, termasuk densitas fluida, kecepatan fluida, ukuran objek dari fluida, dan viskositas fluida<sup>[36]</sup>

Bilangan Reynold tersebut di kalkulasikan dengan menggunakan formula yang membandingkan gaya inersia pada sistem dengan viskositas fluida yang dapat dilihat pada persamaan 2.3

$$Re = \frac{\text{Densitas fluida} \times \text{Kecepatan Aliran} \times \text{Lebar saluran masuk}}{\text{Viskositas fluida}} \quad (2.3)$$

Jika bilangan Reynold yang dihasilkan dari persamaan 2.3 menghasilkan bilangan  $Re < 2300$  maka aliran laminar akan terjadi, sedangkan jika bilangan  $Re > 4000$  maka aliran turbulen yang akan terjadi, pada interval bilangan  $Re$  antara 2300 dan 4000, aliran laminar dan turbulen akan terjadi secara sekaligus (aliran transisi) bergantung pada beberapa factor, seperti kekasaran pipa dan keseragaman aliran<sup>[38]</sup>. Penggunaan metode bilangan Reynold pada proses pengecoran dapat dilakukan untuk memprediksi apakah terjadi turbulensi aliran pada saat proses pengecoran, pada proses penuangan logam cair kedalam cetakan jika terdapat turbulensi maka porositas gas akan timbul karena pengaruh turbulensi<sup>[14]</sup>.

Pada proses pengecoran turbulensi dapat diminimalisir dengan mendesain saluran masuk yang sesuai dengan material yang akan dibuat. Contohnya, baja, besi tuang, dan kebanyakan paduan tembaga adalah material yang tidak terlalu sensitif dengan turbulensi, tetapi paduan aluminium dan magnesium sangat sensitif terhadap turbulensi, hal ini menyebabkan paduan aluminium dan magnesium sangat rentan porositas yang diakibatkan oleh turbulensi<sup>[14]</sup>.

### 2.6.3 PERHITUNGAN LAJU PENDINGINAN

Laju pendinginan pada proses pengecoran paduan logam dapat dihitung menggunakan aturan Chvorinov, aturan Chvorinov atau biasa disebut *Chvorinov's Rule* adalah hubungan matematika yang pertama kali dijelaskan oleh Nicolas Chvorinov pada 1940<sup>[39]</sup>. Aturan ini menghubungkan antara waktu solidifikasi pada pengecoran terhadap volume dan luas permukaan dari produk pengecoran. Dalam penjelasannya, aturan ini menyebabkan bahwa pada kondisi yang sama, pengecoran dengan luas permukaan yang besar dan volume yang kecil akan mengalami pendinginan yang lebih cepat dibandingkan pengecoran dengan luas permukaan produk kecil tetapi volume yang besar hal ini berdasarkan pada persamaan 2.4 dibawah.

$$t = B \left( \frac{V}{A} \right)^n \quad (2.4)$$

Dimana  $t$  adalah waktu solidifikasi,  $V$  adalah volume produk pengecoran,  $A$  adalah luas permukaan dari produk pengecoran yang bersentuhan dengan cetakan,  $n$  adalah konstanta, dan  $B$  adalah konstanta  $\text{mold}^{[40]}$ . Konstanta  $\text{mold}$  bergantung pada properti dari logam, seperti massa jenis, kapasitas panas, *heat of fusion* dan *superheat*, serta cetakan, seperti temperatur initial, massa jenis, konduktivitas termal, kapasitas panas, dan ketebalan dinding cetakan. Satuan dari konstanta  $\text{mold}$  adalah  $\text{min/cm}^{2[41]}$ . Menurut Askeland et al, konstanta  $n$  biasanya adalah 2, namun Degarmo et al menyebutkan bahwa konstanta  $n$  berkisar antara 1.5 dan 2<sup>[14,40]</sup>. Konstanta  $\text{mold}$  dari turan Chvorinov,  $B$ , dapat dikalkulasikan menggunakan persamaan 2.5 yang mengkalkulasikan pengaruh-pengaruh dari material yang digunakan sebagai *mold*, serta logam produk cor yang digunakan dan kondisi lingkungan.

$$B = \left[ \frac{\rho_m L}{(T_m - T_o)} \right]^2 \left[ \frac{\pi}{4k\rho c} \right] \left[ 1 + \left( \frac{c_m \Delta T_s}{L} \right)^2 \right] \quad (2.5)$$

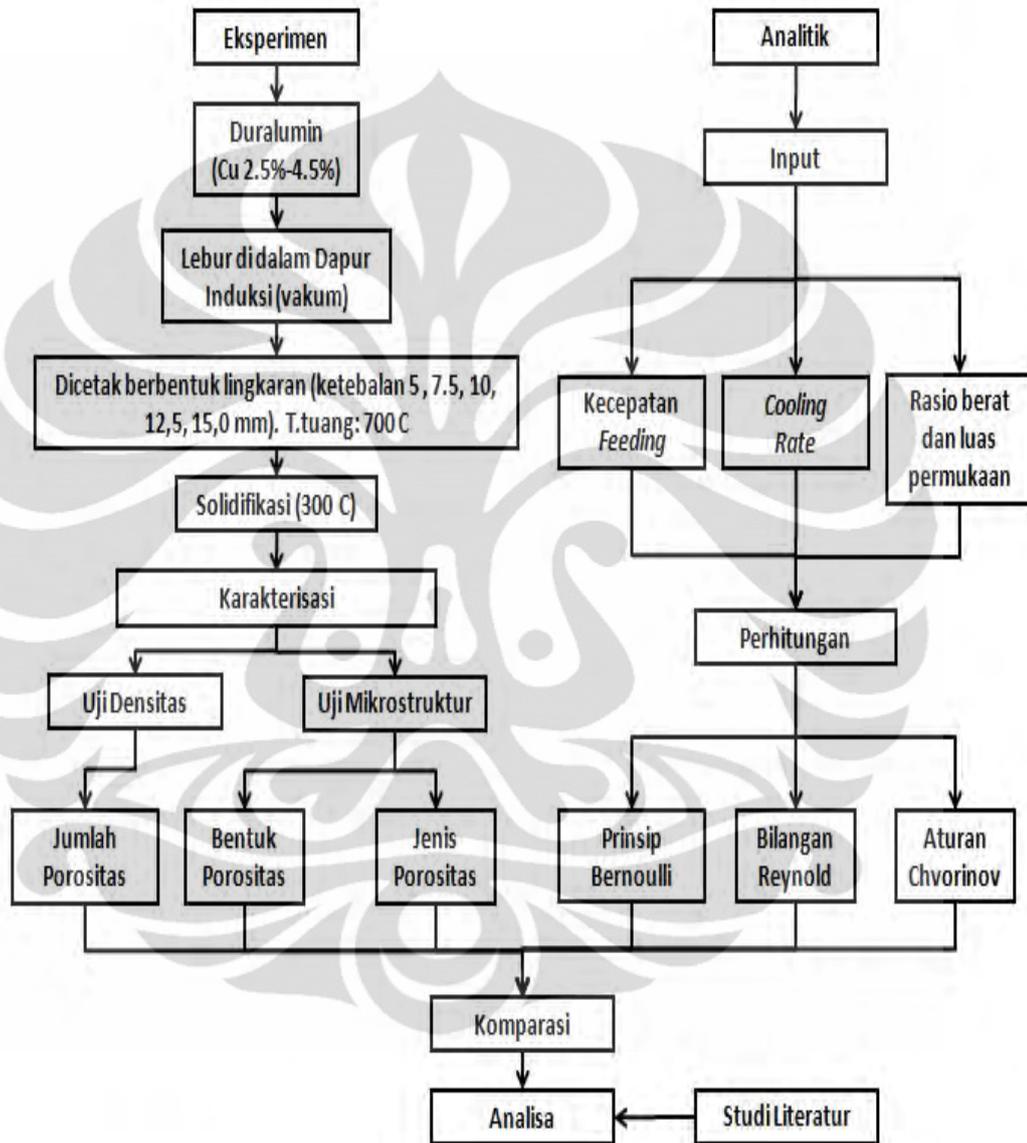
Dimana :

- $B$  : konstanta *mold* ( $\text{min/cm}^2$ )
- $T_m$  : temperatur *melting alloy* (K)
- $T_o$  : temperatur mula-mula dari *mold* (K)
- $\Delta T_s$  :  $= T_{\text{pour}} - T_m = \text{superheat} = 973 - 923 = 50$  (K)
- $L$  : panas laten dari alloy/AlCu (J/gr)
- $k$  : konduktivitas thermal dari *mold* (W/cmK)
- $\rho$  : densitas *mold* ( $\text{gr/cm}^3$ )
- $c$  : *specific heat mold* (J/grK)
- $\rho_m$  : densitas alloy/AlCu ( $\text{gr/cm}^3$ )
- $c_m$  : *specific heat alloy/AlCu* (J/grK)

Aturan Chvorinov di atas hanya berfungsi jika *riser* membeku sebelum produk, karena jika *riser* membeku sesudahnya maka persamaan di atas menjadi tidak berfungsi<sup>[14]</sup>. Laju pendinginan bisa didapatkan dari selisih temperatur tuang dan temperature solidus, dibagi dengan waktu solidifikasi total.

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1. DIAGRAM ALIR PENELITIAN



Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian

### 3.2. PERALATAN DAN BAHAN

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

1. Dapur Induksi
2. Cetakan logam berbentuk elips dengan 5 variasi ketebalan
3. Alat vakum
4. *Optical Emission Spectroscopy*
5. *Digital Camera* .
6. Gergaji logam.
7. Cetakan mounting
8. Mesin amplas.
9. Mesin poles.
10. Mikroskop optik.
11. Jangka sorong.
12. Mikroskop ukur.
13. Lain-lain : kantong plastik, label, spidol, tang penjepit, palu, penggaris, sarung tangan.

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

1. Al-Cu hasil pengecoran sistem vakum
2. Resin
3. Hardener
4. Kertas amplas grid #200, #400, #600, #800, #1000, #1200, dan #1500
5. Alumina ( $Al_2O_3$ )
6. *Keller reagent*
7. Kain poles / beludru
8. Kertas foto

### 3.3. PROSEDUR PENELITIAN

#### 3.3.1 Pengecoran Spesimen Menggunakan Tungku PSV

Dapur yang digunakan dalam pembuatan spesimen adalah dapur induksi dengan kondisi vakum, dapat dilihat pada gambar 3.2 di bawah. *As-cast* (yang telah teridentifikasi unsur kimianya) dimasukkan ke dalam mangkuk peleburan. Proses penuangan dilakukan pada temperatur 700 °C pada cetakan logam permanen berbentuk elips yang telah dilakukan proses *pre-heating* pada temperature 300°C dengan metode *gravity casting*. Gambar cetakan logam permanen dapat dilihat pada gambar 3.3 di bawah.



Gambar 3.2 Dapur Induksi (pengecoran sistem vakum)



Gambar 3.3 Cetakan permanen (baja karbon rendah)

Proses pengecoran ini dilakukan sebanyak 5 kali dengan variasi penambahan unsur tembaga pada masing-masing paduan aluminium yang digunakan, kemudian didinginkan tanpa perlakuan panas (alami). Pada gambar 3.4 di bawah dapat dilihat hasil dari proses pengecoran duralumin menggunakan tungku PSV (pengecoran sistem vakum).



Gambar 3.4 Spesimen duralumin hasil pengecoran (tampak samping)

### 3.3.2 Persiapan Sampel

- **Pemotongan Sampel**

Gergaji tangan digunakan untuk memotong spesimen yang paling tebal menjadi dua bagian sama besar.

- **Mounting**

Proses *mounting* berguna agar sampel yang kecil mudah untuk dipegang ketika harus menjalani proses selanjutnya seperti pengamplasan, pemolesan, etsa, dan pengujian. Selain itu, mounting juga dapat menjaga sampel agar tidak mudah rusak ketika ditangani. Media mounting yang digunakan adalah resin dan hardener. Sampel yang sudah siap di mounting diletakkan di dalam cetakan dengan posisi bagian permukaan yang akan diuji berada pada dasar cetakan. Setelah itu, resin dan hardener dituangkan ke dalam cetakan dengan komposisi yang sesuai. Sampel yang telah dibungkus oleh bahan mounting ini didiamkan sekitar 15 menit agar bahan mounting membeku dan siap untuk dikeluarkan dari cetakan.

- **Pengamplasan Sampel**

Pengamplasan dilakukan dengan ke rtas amplas #80 hingga #1500 dan dilakukan bertahap dimulai dari amplas dengan nomor grid paling kecil (kasar) ke nomor grid yang besar (halus). Pengamplasan dilakukan dengan tujuan untuk mendapatkan kehalusan permukaan dan menghilangkan goresan-goresan kasar pada permukaan sampel.

- **Pemolesan Sampel**

Pemolesan merupakan pelengkap bagi proses pengamplasan. Hasil permukaan yang didapat pada proses pengamplasan belum cukup halus untuk dijadikan sampel uji pengamatan yang berkualitas baik. Pengamplasan sendiri dapat menghasilkan goresan-goresan halus akibat gesekan antara permukaan sampel dengan bidang amplas. Untuk mengatasi masalah seperti ini, dilakukan pemolesan pada permukaan sampel menggunakan zat poles  $TiO_2$  sehingga didapat permukaan sampel yang lebih halus dan mengkilap seperti cermin.

- ***Etching***

Etsa dilakukan untuk mempermudah proses pengamatan mikrostruktur di bawah mikroskop. Etsa yang kami gunakan adalah Keller's Reagent (2 mL HF 48%, 3 mL HCl, 5 mL HNO<sub>3</sub>, 190 mL H<sub>2</sub>O). Prosedur berikut ini sesuai dengan ASM Handbook Vol.9 *Metallography and Microstructure*:

- Basahi permukaan sampel dengan etsa selama 8-15s
- Siram dengan air hangat yang mengalir
- Keringkan (blow dryer)

### 3.3.3 Pengujian Mikroskop Optik

Setelah pengamplasan selesai dengan *grid* terbesar, maka sampel akan dilihat di bawah mikroskop optik dengan perbesaran 50x -200x untuk melihat distribusi porositas gas dan menghitung diameter rata-rata dari semua pori yang ada. Setelah didapat diameter rata-rata maka bisa dihitung secara matematis banyaknya porositas.



Gambar 3.5 Mikroskop Optik

### 3.3.4 Pengujian Densitas

Nilai porositas spesimen akan di dapatkan dengan menggunakan persamaan saltykov sebagai berikut:

- Master timbangan disiapkan dan ditimbang sebagai berat master awal ( $W_s = 230$  gram)
- Keranjang yang berupa kawat jaring sebagai tempat timbangan spesimen, kemudian berat keranjang ditimbang ( $W_k$ )
- Mendapatkan berat akhir master ( $W_{fd}$ )
- Berat keranjang :  $W_k = W_s - W_{fd}$
- Menimbang berat sampel di udara ( $W_a$ )
- Menimbang berat sampel + keranjang dalam air ( $W_{wk}$ )
- Berat akhir master terbaca ( $W_{fz}$ )
- $W_{wk} = W_s - W_{fz}$
- Berat jenis spesimen :

$$\gamma_{sp} = \frac{W_a}{W_a - (W_{wk} - W_k)} \times \gamma_w \quad (3.1)$$

- Menghitung Jumlah porositas ( $Pr$ ) :
- $P = \gamma_t - \gamma_{sp} / \gamma_t \times 100\%$  ( $\gamma_t$  = berat jenis teoritis duralumin) (3.2)

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 ANALISA PRODUK COR

Material produk cor yang akan diteliti kali ini adalah logam duralumin, dengan persentase kandungan unsur sesuai dengan hasil *Optical Emission Spectroscopy* sesuai dengan tabel 4.1 dibawah dan data lengkap seluruh unsur paduan pada duralumin berada pada lampiran 1

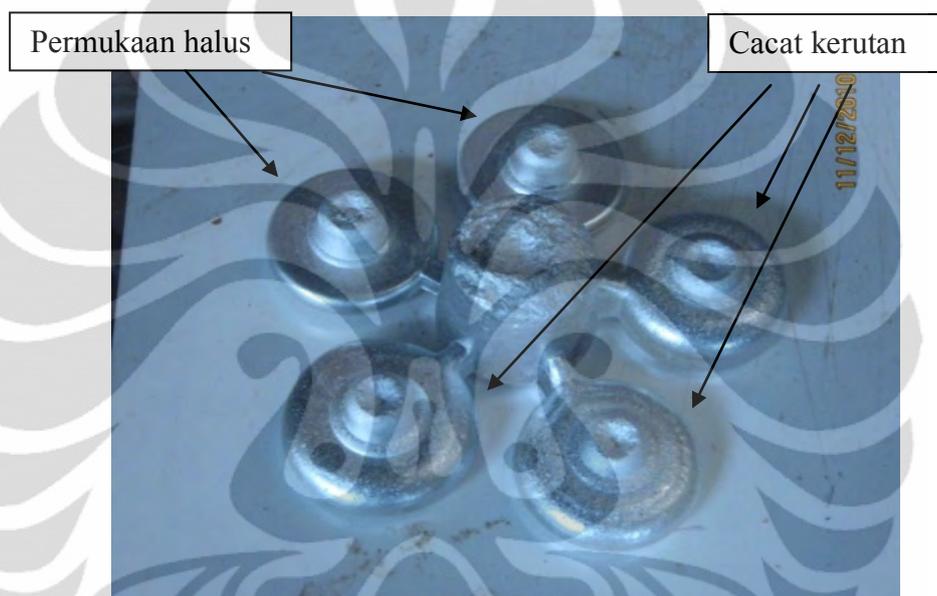
**Tabel 4.1** Unsur-unsur dalam logam duralumin yang dihasilkan

Unsur [%berat]							
Al	Cu	Mn	Si	Mg	Zn	Fe	Lain-lain
96.01	2.49	0.09	0.35	0.16	0.04	0.57	0.29
95.4	3	0.1	0.29	0.18	0.07	0.76	0.2
96.01	3.49	0.11	0.14	0.01	0.01	0.11	0.12
94.6	3.8	0.08	0.51	0.3	0.26	0.34	0.11
92.8	4.49	0.07	0.7	0.22	0.27	0.82	0.63

Persentase unsur-unsur minor dalam duralumin seperti Mn, Si, Mg, Zn, dan Fe pada masing-masing paduan berbeda seperti terlihat dalam tabel 4.1 diatas. Perbedaan tersebut kemungkinan disebabkan oleh adanya pengotor pada proses pengecoran yang berasal dari lingkungan, seperti tempat penyimpanan sebelum dilakukan pengecoran, refraktori yang digunakan, atau alat-alat yang digunakan selama proses pengecoran. Unsur minor tersebut akan berpengaruh terhadap sifat duralumin baik dalam kondisi padat maupun cair, dan pada akhirnya berpengaruh terhadap sifat fisik (berat jenis) dan sifat metalografi (fasa, porositas, mikrostruktur) dari duralumin.

Produk cor yang dihasilkan termasuk dalam kategori duralumin dan termasuk golongan seri 2 *cast alloy*, hal ini berdasarkan data pada table 4.1 yang menunjukkan bahwa produk hasil pengecoran memiliki paduan utama Al-Cu dengan kandungan tembaga kurang dari 5.5%. Tembaga sebagai unsur paduan utama dalam logam duralumin, akan berpengaruh terhadap peningkatan densitas produk hasil pengecoran, peningkatan *strength-to-weight* ratio logam, serta meningkatkan machinability pada paduan, namun penambahan Cu akan mengurangi fluiditas logam pada proses pengecoran<sup>[13]</sup>.

Produk cor yang diteliti dihasilkan dari proses pengecoran sistem vakum dengan tekanan rendah sebesar 40 c mHg dengan menggunakan dapur induksi. Produk yang dihasilkan berbentuk roda dengan lima variasi ketebalan yang berbeda dalam setiap proses pengecoran. Hasil pengecoran memiliki permukaan luar yang halus, dan hampir sempurna mengikuti bentuk cetakan yang digunakan riser terlihat berfungsi sebagaimana mestinya untuk menyuplai kekurangan logam cair akibat proses penyusutan, terlihat dari ujung riser yang berbentuk cekung pada gambar 4.1.



**Gambar 4.1.** Spesimen duralumin hasil pengecoran (tampak atas)

Pada gambar 4.1 terlihat bahwa permukaan produk hasil pengecoran sudah bagus walaupun terdapat beberapa cacat permukaan berupa kerutan pada produk yang memiliki ketebalan tinggi, hal ini diakibatkan karena pada produk yang memiliki ketebalan tinggi mengakibatkan proses solidifikasi berjalan lebih lambat sehingga penyusutan pada permukaan produk sangat signifikan terjadi. Desain cetakan yang digunakan terlihat tidak efisien, dikarenakan riser yang digunakan terlihat sangat berlebihan. Seharusnya perbandingan antara riser dengan produk adalah 1:5 atau 20% dari produk adalah riser<sup>[33]</sup>. Tetapi jika dilihat dari cetakan produk cor yang digunakan ukuran riser memiliki rasio ukuran dengan produk sebesar 4:5, atau ukuran riser yang digunakan sebesar 80% dari produk.

*Sprue* yang digunakan pada cetakan terlihat terlalu besar dengan diameter sebesar 4 cm dan tinggi sebesar 3.5 cm, hal ini bisa mempengaruhi aliran logam

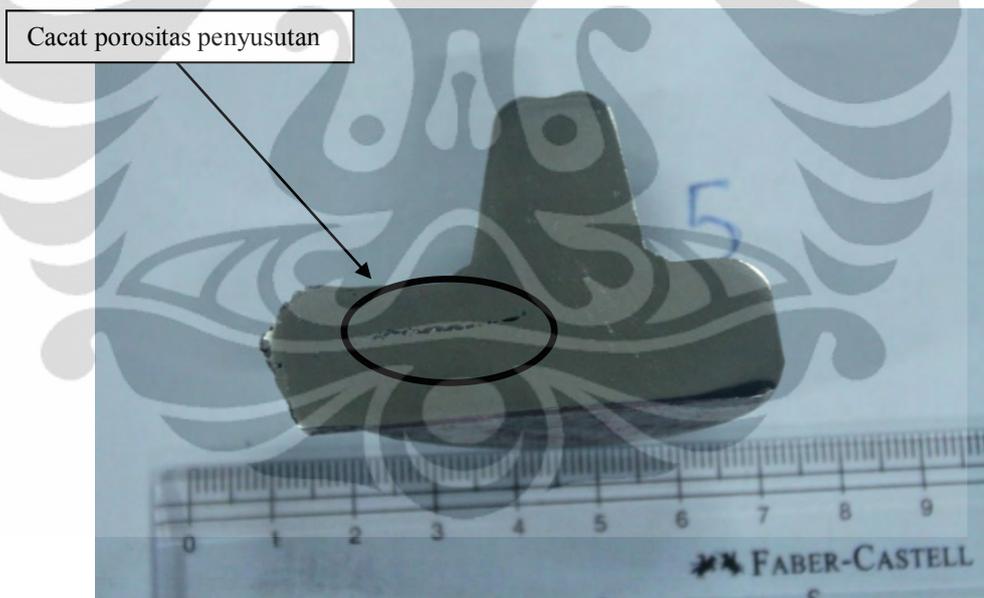
cair yang masuk kedalam cetakan, *sprue* yang terlalu besar sangat memungkinkan terjadinya turbulensi ketika proses penuangan logam cair, turbulensi sendiri merupakan salah satu penyebab besar terjadinya porositas pada produk hasil pengecoran. Terlalu besarnya *sprue* juga dapat mengakibatkan timbulnya daerah panas pada daerah *sprue* yang menyebabkan logam pada produk akan cenderung mengikuti arah panas yang terdapat pada *sprue* pada saat proses solidifikasi yang memungkinkan terjadinya penyusutan pada permukaan produk akibat adanya *hotspot* pada *sprue*.

*Ingate* pada cetakan terlihat kecil dan tipis, dengan tinggi sesuai ukuran produk, dan tebal sebesar 1.5mm hal ini bertujuan untuk mengontrol kecepatan logam cair yang masuk ke dalam cetakan produk, untuk menghindari terjadinya aliran yang terlalu cepat karena dapat menimbulkan terjadinya turbulensi yang berpotensi menimbulkan porositas pada produk. Namun jika *ingate* terlalu kecil yang terjadi adalah terputusnya saluran masuk logam cair karena solidifikasi terjadi lebih cepat sebelum produk diisi logam cair dengan penuh atau disebut dengan misrun.

Pada bagian produk yang dihasilkan, produk yang tipis dengan ketebalan 5 dan 7.5mm cenderung memiliki permukaan yang lebih halus dan bentuknya hampir menyerupai cetakan, berbeda dengan pada produk yang tebal dengan ukuran 10, 12.5, dan 15mm, permukaan yang dihasilkan terlihat tidak sempurna dan banyak daerah yang menyusut dan berkerut, hal tersebut diakibatkan proses solidifikasi yang berbeda-beda pada masing-masing produk, di mana produk yang berbentuk tipis memiliki waktu solidifikasi lebih cepat dibandingkan produk yang tebal. Bagian dalam dari produk terlihat halus dan minim porositas berukuran besar, terlihat pada gambar 4.2 dan 4.3, produk hasil pengecoran di potong menjadi dua bagian, dan dilakukan proses pengamplasan serta pemolesan. sehingga bisa dilihat apakah hasil pengecoran sesuai atau tidak, serta cacat porositas makro bisa dilihat secara langsung.



**Gambar 4.2** Produk cor ketebalan 5mm setelah dibelah dua bagian



**Gambar 4.3.** Produk cor ketebalan 15mm setelah dibelah dua bagian

Dilihat dari gambar 4.2 yaitu produk hasil pengecoran yang paling tipis dengan ketebalan 5 mm, terlihat bentuk permukaannya seperti biasa tidak ada cacat dalam skala makro, dimana porositas tidak terjadi dalam skala besar pada produk pengecoran, tetapi pada gambar 4.3 yaitu produk hasil pengecoran yang paling tebal dengan ukuran 15mm, terlihat adanya bagian yang memiliki cacat porositas

penyusutan yang berukuran lumayan besar, hal ini diakibatkan adanya *hotspot* pada daerah antara riser dan produk yang berukuran tebal.

Pada gambar 4.2 cacat porositas penyusutan yang terjadi cenderung lebih merata dan berbentuk garis-garis di permukaan potongan akibat laju pendinginan yang lebih cepat dibandingkan pada produk dengan ketebalan lebih besar, hal ini disebabkan pada proses solidifikasi pada produk tipis dengan ketebalan 5 mm permukaan produk cenderung membeku lebih cepat, sehingga penyusutan terjadi pada bagian dalam permukaan dan lebih menyebar ke seluruh bagian dari produk. Sedangkan pada gambar 4.3 yaitu pada produk dengan ketebalan 15 mm cacat porositas penyusutan yang terjadi cenderung mengumpul dalam bagian, dan berukuran lebih besar dibandingkan cacat penyusutan pada gambar 4.2, hal ini disebabkan adanya daerah *hotspot* pada produk yang memiliki ketebalan 15 mm yang menyebabkan terjadinya porositas penyusutan yang mengumpul dan berukuran besar seperti pada gambar 4.3.

Pada produk pengecoran yang memiliki ketebalan 10-15 mm juga bagian luar permukaan cenderung menyusut dan terjadi kerutan seperti pada gambar 4.1, hal ini diakibatkan *preheating* yang dilakukan pada cetakan sebesar 300°C mengakibatkan permukaan produk membeku lebih lama dan menimbulkan kerutan dan ketidaksesuaian bentuk dengan cetakan pada bagian permukaan produk yang tebal. Hal ini tidak terjadi pada produk cor dengan ukuran lebih tipis. Karena laju pendinginan relatif lebih cepat dan bentuk produk lebih sesuai dengan cetakan tanpa adanya kerutan pada permukaan produk. Tetapi penyusutan lebih banyak terjadi pada bagian dalam logam produk tipis.

Dalam hal mengatasi terjadinya cacat porositas pada produk dengan ketebalan tinggi, seharusnya digunakan tambahan berupa *chill* untuk mengontrol proses solidifikasi, sehingga meminimalisir cacat yang terjadi, atau temperatur cetakan yang semula sebesar 300°C dikurangi lagi sehingga pembekuan berjalan lebih cepat dan mengurangi resiko terjadinya penyusutan pada bagian dalam permukaan produk hasil pengecoran. Pada produk hasil pengecoran yang telah dipisahkan dari *gating system* nya dan telah dilakukan proses pengamplasan dan pemolesan terlihat di gambar 4.4 bagian permukaan terlihat tidak adanya cacat berukuran makro yang terjadi, proses pengecoran yang menggunakan

pemvakuman meminimalisir cacat porositas yang terbentuk sehingga produk yang dihasilkan memiliki sifat yang baik dan cacat yang terdapat pada produk juga sangat minim.



**Gambar 4.4** Produk hasil pengecoran dengan ketebalan 15mm setelah di pisahkan dari *gating system*

Pada gambar 4.4 terlihat tidak ada cacat berukuran makro yang terbentuk, produk yang dihasilkan sesuai dengan yang diinginkan. Produk berbentuk rod sesuai dengan cetakan, hal ini menunjukkan bahwa proses pengecoran yang dilakukan sudah sesuai walaupun terdapat beberapa kekurangan pada cetakan yang digunakan.

#### 4.2 ANALISA KECEPATAN PENUANGAN

Kecepatan penuangan dalam proses pengecoran duralumin ini dihitung menggunakan prinsip Bernoulli dengan berdasarkan faktor-faktor seperti densitas duralumin yang akan dituang, perbedaan tekanan melting dan tekanan solidifikasi pada proses pengecoran serta pengaruh gravitasi dan tinggi penuangan. Dari perhitungan prinsip Bernoulli berdasarkan persamaan 2.2 yang digunakan, didapatkan hasil berupa kecepatan penuangan dari proses pengecoran yang dapat dilihat pada tabel 4.2 sesuai perhitungan pada lampiran 4.

**Tabel 4.2** Hasil perhitungan kecepatan aliran duralumin cair

Cu (wt%)	$\Delta P$ (atm)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$g$ (m/s <sup>2</sup> )	$h$ (m)	<b>V (m/s)</b>
2.5	1315.8	2855	9.8	0.092	<b>1.650</b>
3	1315.8	2886	9.8	0.092	<b>1.647</b>
3.5	1315.8	2917	9.8	0.092	<b>1.644</b>
4	1315.8	2948	9.8	0.092	<b>1.641</b>
4.5	1315.8	2979	9.8	0.092	<b>1.639</b>

Dari hasil perhitungan menggunakan persamaan 2.2 didapatkan hasil kecepatan aliran fluida duralumin sekitar 1.65 m/s, dari hasil perhitungan yang didapat terlihat bahwa kecepatan aliran akan semakin menurun seiring dengan bertambahnya unsur tembaga pada duralumin. Penambahan unsur tembaga akan meningkatkan densitas logam cair sehingga membuat kecepatan aliran fluida semakin menurun. Kecepatan aliran fluida atau kecepatan penyuangan sangat berpengaruh dalam timbulnya porositas pada produk pengecoran, karena kecepatan penyuangan dapat menimbulkan turbulensi cairan yang menyebabkan terperangkapnya gas pada produk cor, serta berpengaruh terhadap waktu pengisian rongga apakah singkat (*short feeding range*) atau lambat (*long feeding range*).

Untuk memprediksi apakah turbulensi akan terjadi pada proses pengecoran duralumin, digunakan perhitungan bilangan Reynold menggunakan persamaan 2.3 dari aturan tersebut didapatkan hasil perhitungan yang dapat dilihat pada tabel 4.3 dan pada lampiran 4 :

**Tabel 4.3** Hasil perhitungan bilangan Reynold

Cu (wt%)	V (m/s)	D (m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\mu$ (Pa · s)	<b>Re</b>
2.5	1.650	0.04	2855	0.013	<b>14501</b>
3	1.647	0.04	2886	0.013	<b>14631</b>
3.5	1.644	0.04	2917	0.013	<b>14762</b>
4	1.641	0.04	2948	0.013	<b>14893</b>
4.5	1.639	0.04	2979	0.013	<b>15024</b>

Sesuai kriteria bilangan Reynold yang menyatakan bahwa Jika bilangan Reynold yang dihasilkan dari persamaan (3) menghasilkan bilangan  $Re < 2300$  maka aliran laminar akan terjadi, sedangkan jika bilangan  $Re > 4000$  maka aliran

turbulen yang akan terjadi, pada interval bilangan  $Re$  antara 2300 dan 4000, aliran laminar dan turbulen akan terjadi secara sekaligus<sup>[38]</sup>. Maka dilihat dari bilangan Reynold yang dihasilkan dari persamaan (3) untuk kandungan tembaga 2.5-4.5% semuanya memiliki nilai  $> 4000$ , jenis aliran yang dihasilkan adalah aliran turbulen. Dilihat dari jenis aliran yang terjadi, maka diprediksikan porositas gas akan timbul pada proses pengecoran akibat terperangkapnya gas karena turbulensi aliran. Jika dilihat dari persamaan bilangan Reynold, untuk menghindari terjadinya aliran turbulen pada proses pengecoran duralumin, hal yang dapat dilakukan adalah mengurangi diameter masuknya cairan pada cetakan (diameter *sprue*) atau mengurangi kecepatan aliran logam cair pada proses pengecoran.

Mempertimbangkan kedua cara untuk menghindari turbulensi tersebut, jika dilakukan pengurangan kecepatan aliran logam cair, yang terjadi adalah semakin lamanya proses pengecoran yang mengakibatkan terjadinya waktu pengisian rongga yang lama (*long feeding range*) yang berdampak pada proses solidifikasi lebih cepat sebelum logam cair mampu mengisi seluruh rongga (misrun). Jadi hal yang dapat dilakukan untuk mengurangi turbulensi pada proses pengecoran dari aspek bilangan Reynold hanyalah mengurangi diameter masuknya logam cair pada *sprue*, hal ini dinilai paling memungkinkan karena resiko yang ditimbulkan lebih sedikit.

#### 4.3 ANALISA LAJU PENDINGINAN

Laju pendinginan didapatkan setelah menghitung waktu pendinginan total selama proses pengecoran menggunakan aturan Chvorinov sesuai persamaan 2.4, waktu pendinginan total dihitung untuk masing-masing duralumin dengan perbedaan kadar tembaga, serta dengan perbedaan ketebalan. Hasil yang didapatkan dari perhitungan waktu solidifikasi total menggunakan aturan Chvorinov terlihat pada tabel 4.4 dengan data properti material serta perhitungan konstanta mold yang dapat dilihat pada lampiran 2 dan 3

**Tabel 4.4** Waktu solidifikasi total

Cu (wt%)	Waktu solidifikasi total (s)				
	tebal 5mm	tebal 7.5mm	tebal 10mm	tebal 12.5mm	tebal 15mm
2.5	10.401	19.94	30.566	41.604	52.655
3	10.828	20.76	31.823	43.314	54.82
3.5	11.273	21.613	33.13	45.094	57.07
4	11.737	22.502	34.493	46.949	59.42
4.5	12.219	23.426	35.91	48.878	61.861

Dari tabel 4.4 di dapatkan data waktu solidifikasi total yang semakin lama dengan bertambahnya kandungan tembaga, dan peningkatan waktu yang signifikan seiring penambahan ke tebalan dari produk pengecoran. Penambahan kandungan tembaga pada produk akan meningkatkan densitas produk, juga menurunkan temperatur liquidus dari duralumin. Hal ini menyebabkan waktu solidifikasi yang dibutuhkan lebih tinggi jika mengacu kepada persamaan aturan Chvorinov.

Dilihat dari persamaan aturan Chvorinov, bisa disimpulkan bahwa pengecoran dengan perbandingan antara volume dan luas permukaan yang lebih besar cenderung membeku lebih lambat dibandingkan jika ratio volume dan luas permukaan lebih kecil. Untuk membuat riser menyuplai logam cair ke dalam produk, waktu solidifikasi total pada riser harus lebih lama dibandingkan waktu solidifikasi total pada produk.

Jika di lihat dari persamaan aturan Chvorinov, karena riser dan kons tanta mold akan sebanding, maka desain riser harus memiliki ratio perbandingan volume dan luas permukaan yang besar, sehingga produk pengecoran membeku lebih dahulu, dan riser akan membeku terakhir, hal ini akan meminimalisir terjadinya porositas penyusutan pada produk. Penambahan densitas pada duralumin juga akan menyebabkan panas yang terkandung dalam produk akan semakin meningkat, oleh karena itu waktu yang dibutuhkan sebuah produk dengan densitas lebih besar untuk proses solidifikasi lebih lama dibandingkan dengan produk yang memiliki densitas lebih kecil.

Karena proses solidifikasi adalah proses yang membebaskan panas dari sistem ke lingkungan) maka semakin banyak panas yang harus dikeluarkan, maka akan semakin lama pula proses solidifikasi total yang dimilikinya. Laju pendinginan menunjukkan tingkat perubahan temperatur dibandingkan dengan perubahan waktu pada saat proses solidifikasi terjadi. Laju pendinginan bisa didapatkan dengan menghitung selisih temperatur ( $T_{pouring} - T_{solid}$ ) pada solidifikasi, dengan selisih waktu (waktu solidifikasi total hasil persamaan 2.4). Hasil perhitungan laju pendinginan yang didapatkan dapat dilihat pada tabel 4.5

**Tabel 4.5** Laju pendinginan

Cu (wt%)	Laju pendinginan (K/s)				
	tebal 5mm	tebal 7.5mm	tebal 10mm	tebal 12.5mm	tebal 15mm
2.5	14.61	7.62	4.97	3.65	2.88
3	14.03	7.32	4.77	3.50	2.77
3.5	13.48	7.03	4.58	3.37	2.66
4	12.95	6.75	4.40	3.23	2.55
4.5	12.43	6.48	4.23	3.10	2.45

Dari tabel 4.5 diatas dapat dilihat bahwa laju pendinginan pada proses pengecoran ini cenderung menurun seiring bertambahnya kandungan tembaga, serta menurun drastis seiring bertambahnya ketebalan. Dari hasil prediksi laju pendinginan pada proses pengecoran, parameter terbentuknya porositas gas dan penyusutan dapat diprediksikan, dimana dengan meningkatnya laju pendinginan maka akan meningkatkan jumlah porositas gas, dan menurunkan ukuran dari porositas gas serta fraksi volume dari porositas gas<sup>[45]</sup>.

Alasan dari fenomena tersebut karena ketika paduan logam dicor, bagian luar dari logam adalah bagian pertama yang mengalami proses solidifikasi. Karena itu, gas hidrogen yang terperangkap dalam logam cair tidak akan bisa keluar karena permukaan logam sudah menjadi fase padatan dan gas hidrogen akan terperangkap didalam logam.

Semakin lama proses solidifikasi pada bagian dalam logam, maka semakin banyak waktu untuk gelembung-gelembung hidrogen yang berukuran kecil untuk

bergabung dan berdifusi untuk menghasilkan gelembung gas hidrogen yang lebih besar. Jadi ketika proses solidifikasi berjalan lebih cepat, gelembung gas hidrogen akan lebih banyak, tetapi berukuran lebih kecil dibandingkan dengan produk yang mempunyai waktu solidifikasi yang lama, karena pada pengecoran dengan waktu solidifikasi lama, gelembung gas cenderung berdifusi membentuk gelembung porositas gas yang berukuran lebih besar. Juga, pada pengecoran dengan waktu solidifikasi yang lama, akan memiliki fraksi volum porositas yang lebih besar karena hidrogen memiliki waktu yang lebih panjang untuk berdifusi<sup>[45]</sup>.

Secara garis besar, pada proses pengecoran non-vakum, bisa disebutkan bahwa dengan meningkatnya laju pendinginan, akan menghasilkan:

1. Lebih banyak gelembung porositas gas
2. Ukuran porositas gas lebih kecil
3. Berkurangnya fraksi volum dari porositas gas

Namun pada pengecoran sistem vakum, hal yang terjadi adalah sebaliknya, karena sesuai dengan prinsip difusi, di mana gas akan berdifusi dari daerah berkonsentrasi tinggi ke daerah berkonsentrasi rendah. Maka yang terjadi pada pengecoran sistem vakum yaitu gas hidrogen yang terkandung pada logam akan berdifusi ke luar logam, dikarenakan daerah sekitarnya yang berada dalam kondisi vakum, yang memiliki konsentrasi gas hidrogen yang rendah. Pada pengecoran sistem vakum, semakin lama waktu solidifikasi total yang dibutuhkan dalam proses pengecoran, maka semakin banyak pula waktu bagi gas-gas yang terperangkap dalam logam untuk berdifusi ke luar logam. Hal ini menyebabkan semakin lama waktu solidifikasi total yang didapatkan, berarti semakin sedikit porositas gas yang terjadi. Dan semakin cepat waktu solidifikasi total yang digunakan, maka gas hidrogen yang terperangkap dalam logam tidak sempat untuk berdifusi ke arah luar logam dan menyebabkan porositas gas tidak berkurang.

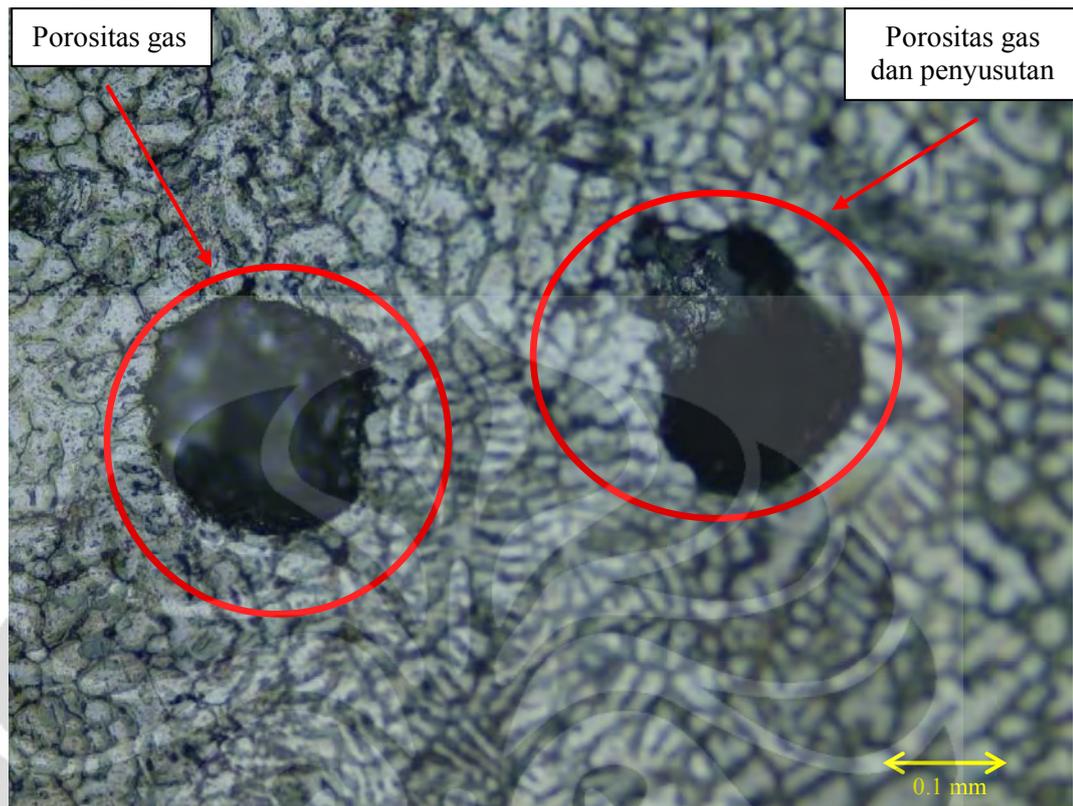
Ukuran gelembung gas yang terjadi pada pengecoran sistem vakum akan cenderung lebih kecil dibandingkan dengan pengecoran non-vakum hal ini disebabkan oleh prinsip difusi gas yang menyatakan bahwa gas akan berdifusi ke dari daerah berkonsentrasi tinggi ke daerah berkonsentrasi rendah, Pada

pengecoran sistem vakum, perbedaan waktu solidifikasi total tidak jauh berbeda dibandingkan dengan pengecoran non-vakum. Hal ini dikarenakan pada pengecoran dengan waktu solidifikasi total yang lama, gas akan berdifusi ke arah terdekat terlebih dahulu. Jadi sebelum gas berdifusi keluar dari logam, gas tersebut cenderung akan mengumpul dan membentuk gelembung gas hidrogen yang lebih besar dibandingkan dengan pengecoran dengan waktu solidifikasi total yang lebih kecil.

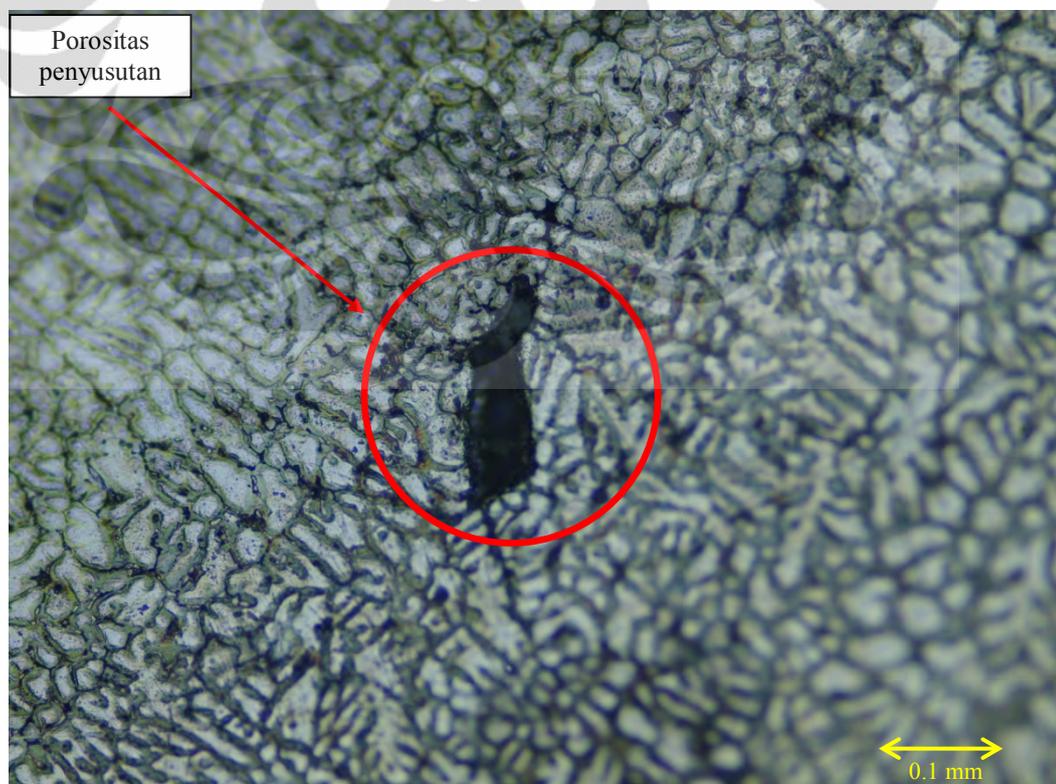
#### 4.4 ANALISA MIKROSTRUKTUR POROSITAS

Produk hasil pengecoran yang telah dilakukan pengamplasan dan pemolesan serta etsa kimia dengan *keller reagent* diamati mikrostruktur dari porositasnya dengan menggunakan mikroskop optik dengan variasi perbesaran 50-200 kali untuk mengamati porositas gas dan porositas penyusutan yang terbentuk. Porositas gas dapat dengan mudah dibedakan dengan porositas penyusutan, dilihat dari bentuk mikrostrukturnya dimana porositas gas berbentuk lingkaran, sedangkan porositas penyusutan cenderung berbentuk sembarang. Namun ada beberapa porositas yang terjadi merupakan gabungan antara porositas gas dan penyusutan, dimana bentuk dari porositas tersebut adalah lingkaran yang memiliki sudut-sudut sembarang sebagian.

Produk hasil pengecoran yang dilihat mikrostrukturnya bervariasi dari Al 2.5%Cu – Al 4.5% Cu serta dengan masing-masing variabel ketebalan antara 5mm – 15mm.



**Gambar 4.5.** Foto mikro porositas gas Al-2.5Cu ketebalan 5mm dengan perbesaran 100x (bagian putih :  $\alpha$  dendrit , bagian hitam : Fasa eutektik)



**Gambar 4.6.** Foto mikro porositas penyusutan Al-2.5Cu ketebalan 5mm dengan perbesaran 100x (bagian putih :  $\alpha$  dendrit , bagian hitam : Fasa eutektik)

Pada gambar 4.5 dapat dilihat adanya *void* dengan bentuk lingkaran yang menandakan adanya gelembung gas yang terperangkap pada proses solidifikasi, yang menyebabkan timbulnya porositas gas pada produk hasil pengecoran. Porositas gas pada produk cor terbentuk akibat perbedaan tingkat kelarutan gas antara fasa padatan dengan fasa cairan sehingga hidrogen yang terlarut pada fasa cair terperangkap dalam bentuk gelembung gas pada fasa padat. Pada gambar 4.6 terlihat adanya *void* mirip dengan gambar 4.5 tetapi memiliki bentuk yang lebih sembarang dibandingkan pada gambar 4.5, cacat tersebut adalah cacat porositas penyusutan, berbeda dengan cacat porositas gas yang timbul akibat perbedaan tingkat kelarutan gas hidrogen antara fasa padatan dan fasa cairan logam, porositas penyusutan terjadi karena perbedaan densitas antara fasa padatan dan fasa cairan, hal ini menyebabkan produk cor mengalami penyusutan pada bagian yang paling lama membeku (*hotspot*).

Pada gambar 4.5 juga terdapat bentuk *void* hampir berbentuk lingkaran, tetapi memiliki bagian dengan bentuk sembarang, *void* itu adalah porositas gas dan penyusutan yang terjadi dalam satu tempat. Porositas ini diakibatkan penyusutan yang terjadi tepat di daerah terdapatnya gelembung gas yang terperangkap dalam produk hasil pengecoran sehingga mengakibatkan dua jenis porositas terperangkap dalam satu *void* yang sama. Porositas gas bisa dibedakan jenis dan penyebabnya berdasarkan ukuran porositas gas yang diamati, jenis dan penyebabnya diklasifikasikan menjadi tiga jenis sesuai dengan tabel 4.5 dibawah ini :

**Tabel 4.6** Jenis dan penyebab porositas gas berdasarkan ukurannya<sup>[46]</sup>

<b>Scale</b>	10 - 100 mm	1 - 5 mm	0.05 - 0.5 mm
<b>Cause</b>	Core blows	Air entrainment	Hydrogen precipitation
<b>Short <math>\Delta T_f</math></b>	No direct effect of freezing range	No direct effect of freezing range	Round micropores
<b>Long <math>\Delta T_f</math></b>	No direct effect of freezing range	No direct effect of freezing range	Interdendritic appearance of micropores

Dari tabel 4.6 diatas dapat dilihat perbedaan dari 3 jenis porositas gas yang biasa terjadi, pada eksperimen pengecoran ini *core blows* tidak ada karena cetakan yang digunakan berupa cetakan logam, *core blows* biasa terjadi pada pengecoran dengan cetakan pasir. Gas terperangkap (*air entrainment*) juga tidak ada menurut pengamatan mikroskopis (mikroskop optik) dan makroskopis. Hal ini terjadi karena gas terperangkap diminimalisir oleh proses pemvakuman yang dilakukan pada pengecoran.

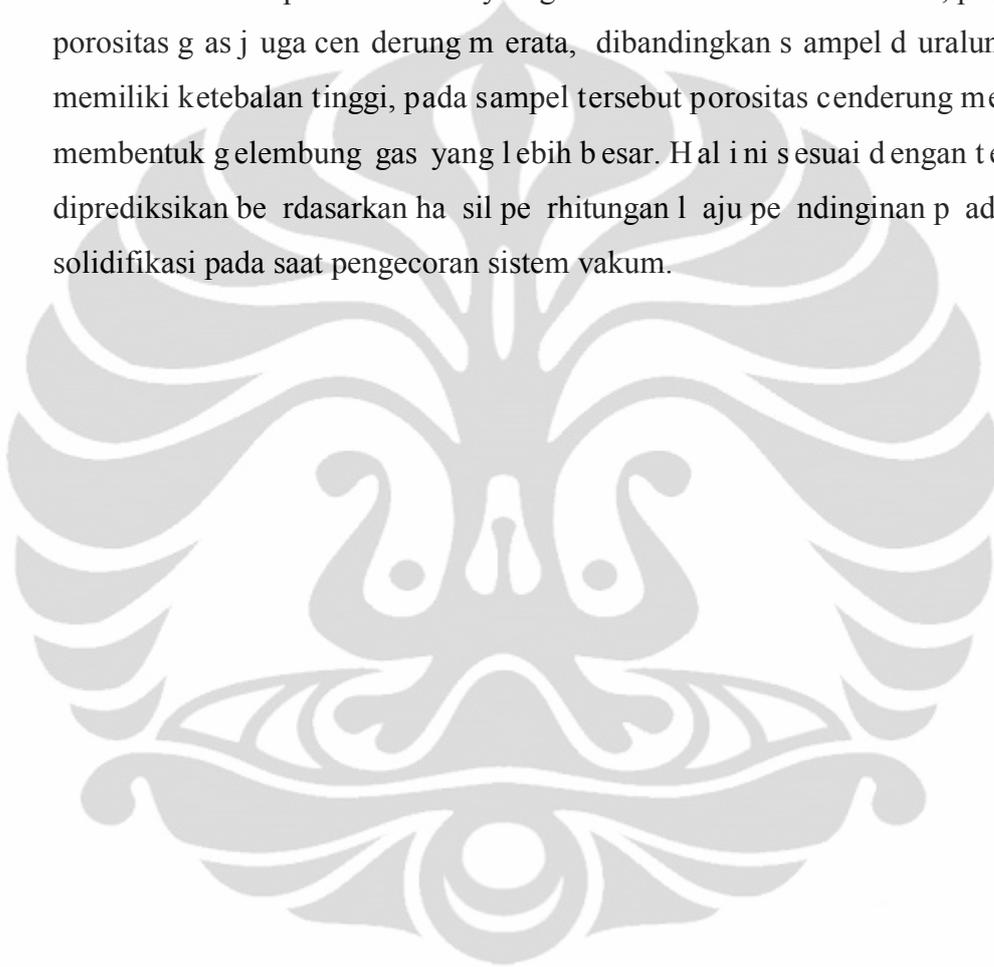
Dilihat dari jenis ukurannya, pengamatan mikroskopis yang dilakukan menemukan porositas dengan ukuran berkisar antara 50 -200 mikrometer atau 0.05-0.2 mm yang termasuk dalam kategori mikroporositas akibat hidrogen presipitasi, bergantung pada paduan duralumin dan ketebalan duralumin, hal ini mengacu pada teori yang dijelaskan di bab 4.3, dimana ukuran dari butir porositas akan bergantung pada laju pendinginan yang dipengaruhi oleh densitas dan ketebalan produk.

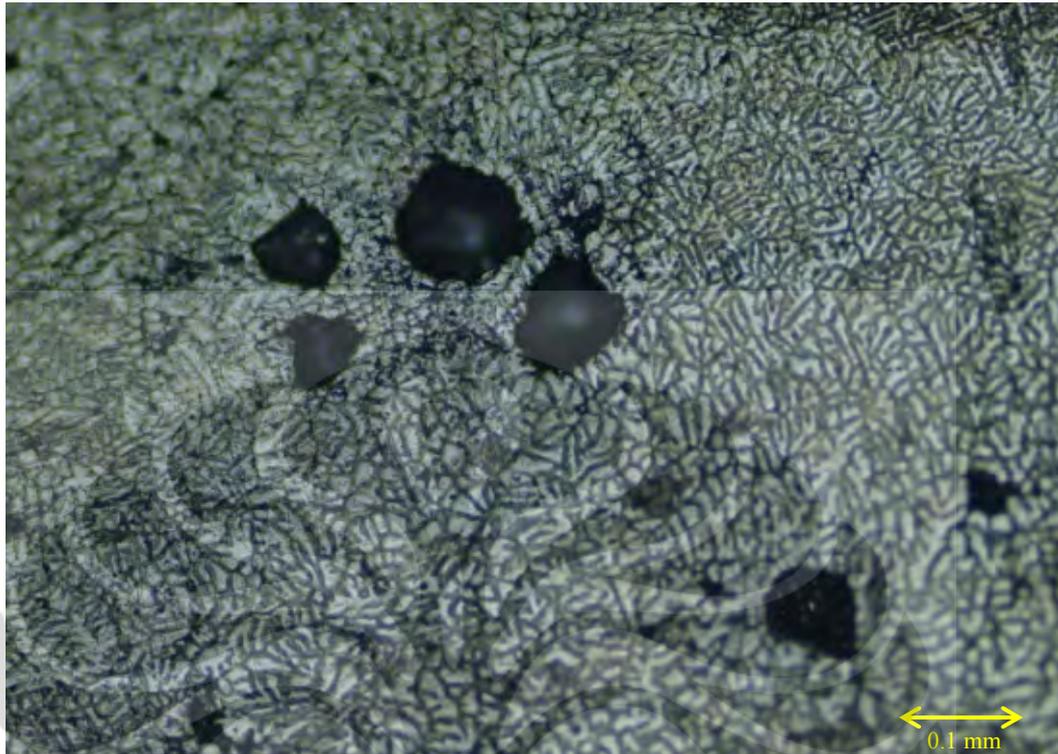
Untuk mengetahui perbedaan ukuran porositas gas yang terjadi pada sampel duralumin hasil pengecoran sistem vakum dengan perbedaan ketebalan tetapi memiliki kandungan unsur paduan yang sama dapat dilihat pada gambar 4.7 (a) dan (b) di bawah. Dari gambar 4.7 (a) dan (b) di bawah dapat dilihat perbandingan ukuran dan jumlah porositas gas yang terjadi, di mana dengan perbesaran yang sama ukuran porositas yang terlihat cenderung lebih besar pada produk hasil pengecoran dengan ketebalan 15mm dengan ukuran rata-rata porositas pada gambar 4.7 (a) sebesar 105 mikrometer sedangkan pada gambar 4.7(b) ukuran porositas gas yang terjadi adalah 160 mikrometer. Hal ini sesuai dengan prediksi ukuran porositas berdasarkan laju pendinginan yang menyatakan bahwa semakin tinggi laju pendinginan maka semakin kecil ukuran porositas yang terjadi. Sesuai dengan data perhitungan laju pendinginan, produk dengan tebal 5mm memiliki laju pendinginan lebih tinggi jika dibandingkan produk dengan tebal 15mm.

Pada gambar 4.7 (a) juga terlihat banyaknya gelembung-gelembung berdekatan yang terjadi, hal ini dikarenakan belum sempatnya gelembung-gelembung gas hidrogen untuk berkumpul dan berdifusi membentuk sebuah gelembung lebih besar akibat laju pendinginan yang lebih cepat, namun jika

dibandingkan dengan foto mikrostruktur di gambar 4.7 (b) yang terjadi adalah porositas berukuran lebih besar, namun terlihat hanya berdisersi sendiri, dan tidak ada gelembung-gelembung gas lainnya yang berdekatan, ini terjadi karena laju pendinginan yang lambat menyebabkan gas hidrogen sempat untuk berkumpul dan berdifusi membentuk gelembung gas yang lebih besar.

Pada sampel duralumin yang memiliki ketebalan rendah, penyebaran porositas gas juga cenderung merata, dibandingkan sampel duralumin yang memiliki ketebalan tinggi, pada sampel tersebut porositas cenderung mengumpul membentuk gelembung gas yang lebih besar. Hal ini sesuai dengan teori yang diprediksikan berdasarkan hasil perhitungan laju pendinginan pada proses solidifikasi pada saat pengecoran sistem vakum.





(a)

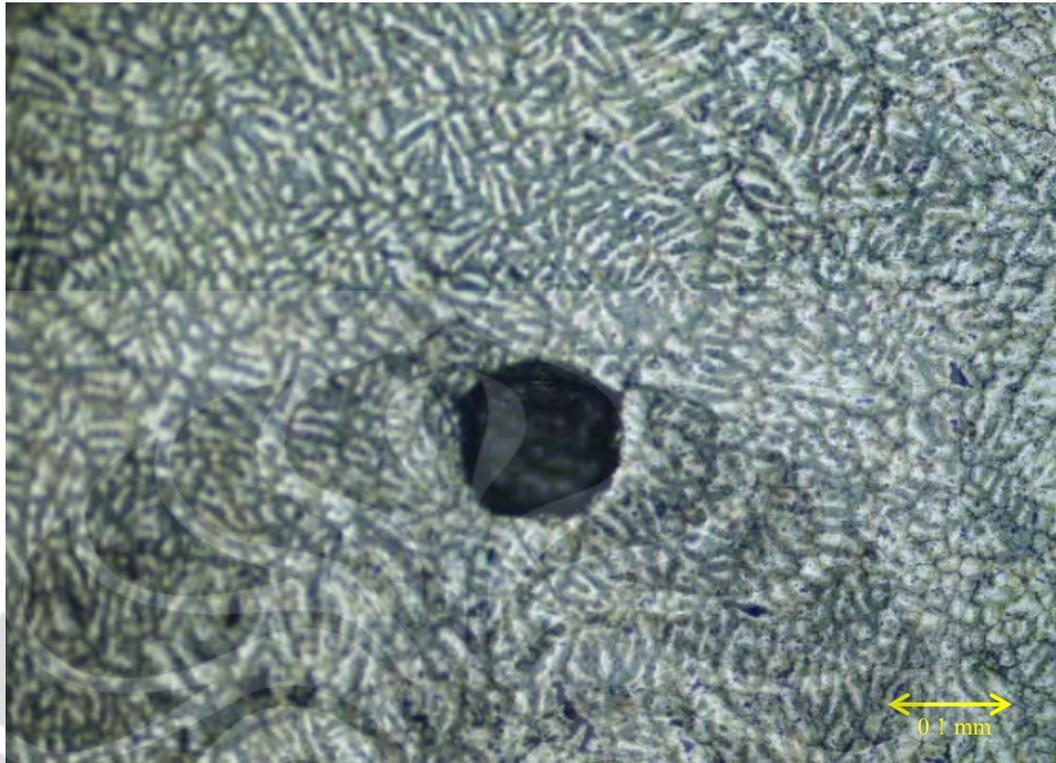


(b)

**Gambar 4.7** (a) porositas gas Al-3.5Cu pada ketebalan 5mm dengan perbesaran 100x (b) porositas gas Al-3.5Cu pada ketebalan 15mm dengan perbesaran 100x (bagian putih :  $\alpha$  dendrit , bagian hitam : Fasa eutektik)

Untuk mengetahui perbedaan ukuran dan bentuk porositas gas yang terjadi pada sampel duralumin hasil pengecoran sistem vakum dengan perbedaan kandungan unsur tembaga, tetapi memiliki ketebalan yang sama dapat dilihat pada gambar 4.8 (a) dan (b) dibawah. Dari foto mikrostruktur di gambar 4.8 (a) dan (b), terlihat ukuran porositas gas yang terjadi cenderung lebih besar pada duralumin pada gambar (b) dengan kandungan tembaga 4.5%, dibandingkan pada gambar 4.8 (a) dimana pada gambar 4.8 (a) ukuran porositas gas yang terjadi adalah 140 mikrometer sedangkan pada gambar 4.8 (b) ukuran porositas gas yang terjadi adalah 195 mikrometer. Hal ini dikarenakan perbedaan kandungan tembaga akan meningkatkan densitas dari logam, yang akan mempengaruhi laju pendinginan. Namun perbedaan karakteristik porositas gas yang terjadi pada produk dengan perbedaan kadar tembaga tidak terlalu signifikan dibanding dengan produk hasil pengecoran dengan perbedaan ketebalan. Hal ini dikarenakan perbedaan laju pendinginan yang diakibatkan oleh perbedaan densitas tidak sebesar perbedaan laju pendinginan akibat perbedaan ketebalan produk.

Selain disebabkan oleh perbedaan laju pendinginan, perbedaan ukuran porositas yang terjadi diakibatkan karena pada duralumin dengan kandungan tembaga lebih banyak, maka fasa eutektik yang terbentuk pada logam akan semakin besar, dengan semakin banyaknya daerah eutektik pada logam maka akan memberikan ruang yang lebih banyak untuk gas hidrogen yang terperangkap untuk membentuk porositas gas. Hal ini terjadi karena pada proses solidifikasi, gas hidrogen terlarut pada daerah alfa dendrit akan keluar menuju *mushy zone* sedangkan gas yang terlarut pada fasa eutektik akan terperangkap karena membeku lebih lama<sup>[45]</sup>. Hal ini terlihat dari lebih besarnya porositas yang terjadi pada gambar 4.8 (b) dibanding pada gambar 4.8 (a) akibat perbedaan daerah fasa eutektik yang terbentuk pada logam tersebut. Dari kedua faktor tersebut, dapat disimpulkan bahwa penambahan tembaga pada logam duralumin akan mempengaruhi ukuran porositas gas yang terjadi, dimana semakin banyak kandungan tembaga pada duralumin, maka porositas gas yang terjadi akan semakin besar, dan begitupun sebaliknya jika kandungan tembaga berkurang, maka porositas gas yang terjadi akan lebih kecil.



(a)

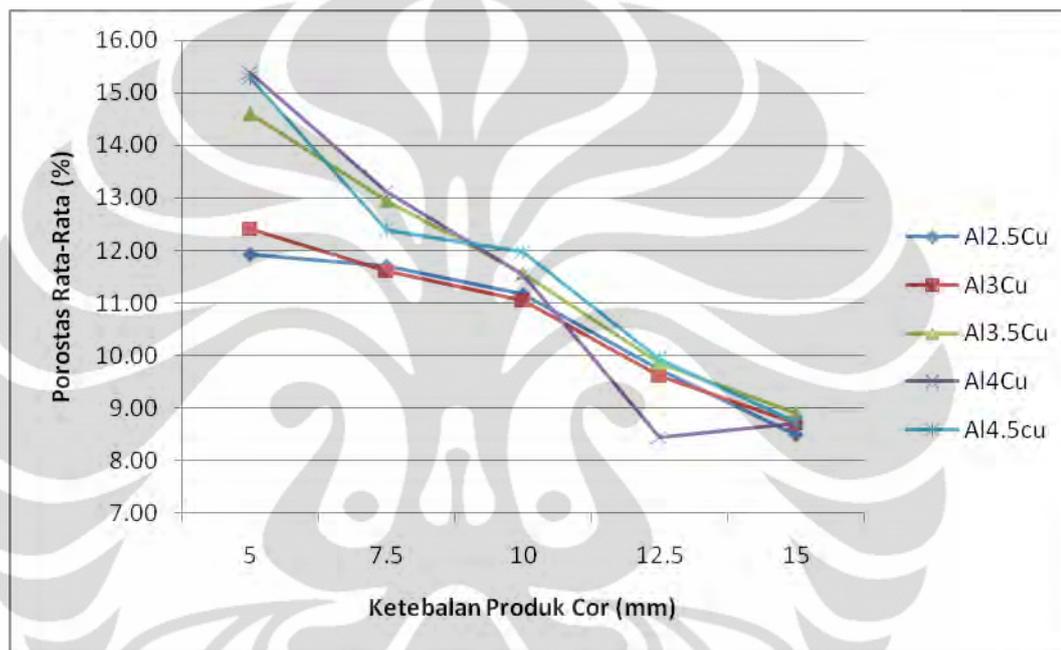


(b)

**Gambar 4.8** (a) porositas gas Al-2.5Cu pada ketebalan 15mm dengan perbesaran 100x (b) porositas gas Al-4.5Cu pada ketebalan 15mm dengan perbesaran 100x (bagian putih :  $\alpha$  dendrit , bagian hitam : Fasa eutektik)

#### 4.5 ANALISA KUANTITAS POROSITAS

Hasil penelitian kandungan porositas yang terbentuk pada pengecoran sistem vakum duralumin dengan metode persamaan saltykov sesuai persamaan 3.1 dan persamaan 3.2 dilakukan dengan membandingkan densitas produk hasil perhitungan teoritis dengan densitas produk hasil piknometri, menghasilkan data seperti dalam gambar 4.9 dibawah, hasil perhitungan serta komponen-komponen untuk perhitungan persamaan saltykov dapat dilihat pada lampiran 5-9



Gambar 4.9 Grafik porositas produk cor

Data presentasi porositas pada gambar 4.9 menunjukkan bahwa produk hasil pengecoran yang memiliki ketebalan lebih tinggi mempunyai waktu solidifikasi total yang lebih lama, sehingga member kesempatan bagi gas hidrogen untuk difusi keluar dari duralumin cair ketika proses solidifikasi berjalan. Dengan semakin tebalnya produk hasil pengecoran, maka gas hidrogen yang terjebak semakin sedikit, akibatnya porositas gas dalam produk hasil pengecoran tersebut akan menurun. Semakin tipis produk, maka porositas yang akan terjadi semakin tinggi karena gas hidrogen yang terperangkap masih banyak. Disamping itu ketebalan produk hasil pengecoran mengindikasikan laju pendinginan, semakin tebal produk, maka laju pendinginannya semakin lambat.

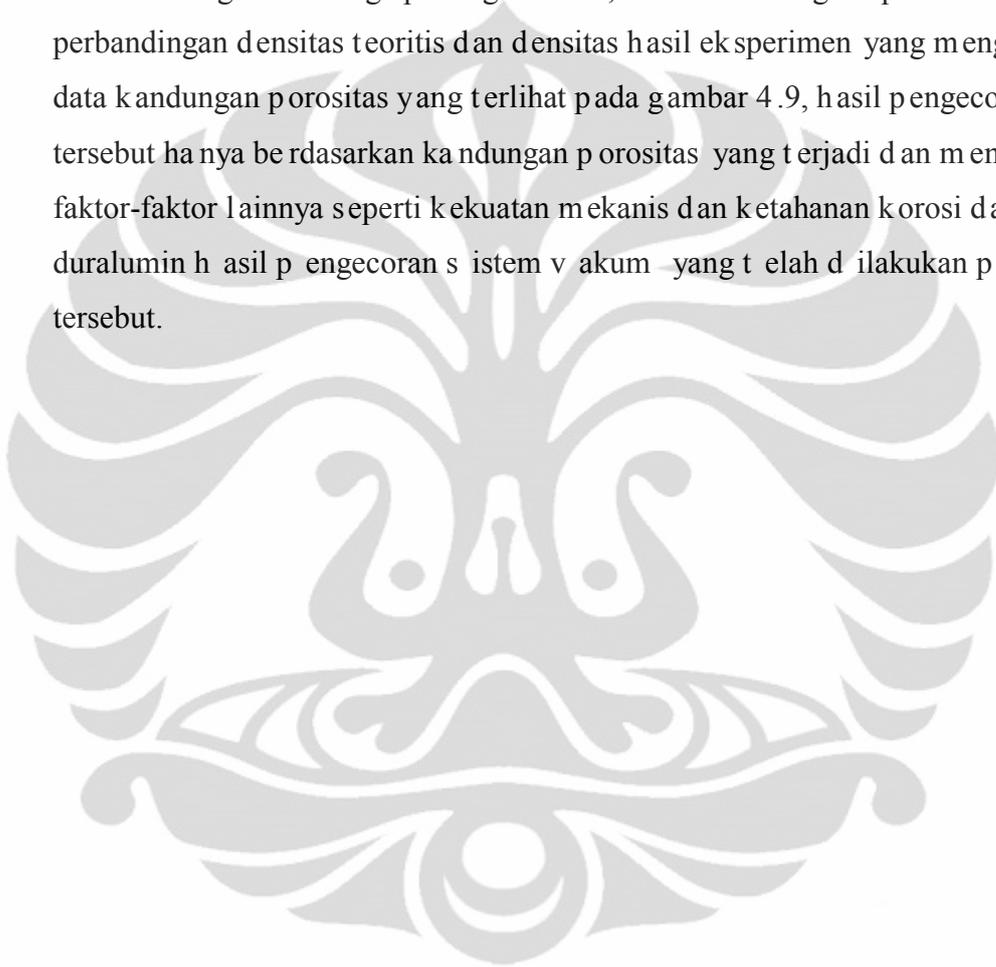
Dari hasil perhitungan laju solidifikasi total menggunakan aturan Chvorinov, didapatkan hasil yang berbanding terbalik dengan data porositas,

dimana semakin lama waktu solidifikasi total, maka porositas semakin berkurang. Hal ini hanya terjadi pada pengecoran dengan sistem vakum, karena pada pengecoran sistem vakum hidrogen akan berdifusi ke arah luar produk akibat proses pemvakuman, jadi semakin lama waktu solidifikasi berjalan akan semakin banyak pula gas hidrogen yang keluar dari produk sehingga porositas yang terjadi akan semakin sedikit.

Bertambahnya kandungan persentase tembaga pada duralumin juga akan mengakibatkan porositas bertambah, sesuai pada gambar 4.9, hal ini sejalan dengan menurunnya ampu alir logam duralumin dengan bertambahnya %Cu. Semakin menurunnya ampu alir logam, maka kemungkinan untuk terjadinya porositas meningkat, karena logam akan sulit untuk menyuplai daerah kekosongan pada saat proses solidifikasi, karena logam mengalami penyusutan akibat perbedaan densitas padatan dan cairan. Penambahan unsur tembaga berkaitan meningkatnya jumlah porositas dapat dipahami karena kelarutan hidrogen dalam tembaga lebih tinggi dibanding aluminium disamping itu penambahan tembaga meningkatkan temperatur dari duralumin cair sehingga hidrogen terlarut meningkat. Penambahan tembaga dalam paduan duralumin dapat meningkatkan berat jenis duralumin dan porositas<sup>[33]</sup>, hal ini sudah sejalan dengan teori yang menyatakan suhu peleburan merupakan fungsi ke larutan hidrogen dalam pengecoran paduan aluminium. Penambahan tembaga pada duralumin juga akan meningkatkan jumlah fase eutektik yang terbentuk dan menyebabkan lebih banyaknya daerah nukleasi porositas gas pada logam duralumin.

Porositas menurut hasil perbandingan densitas teoritis dan densitas hasil eksperimen berkisar antara 8-15%, hal ini relatif besar dan kurang sesuai dengan realitas produk cor yang dihasilkan, produk hasil pengecoran yang didapatkan terlihat minim porositas, baik secara makroskopis atau mikroskopis. Hal ini diakibatkan perhitungan densitas teoritis yang hanya menggunakan berat jenis logam berdasarkan literatur, tetapi pada kenyataannya logam yang digunakan tidak memiliki densitas yang sama persis dengan literatur, hal ini disebabkan oleh adanya unsur-unsur pengotor pada saat pengecoran. Perbedaan densitas yang sangat sedikit pun bisa sangat mempengaruhi nilai porositas hasil perhitungan yang digunakan.

Dari hasil penelitian mengenai persentase porositas pada masing-masing duralumin hasil sistem pengecoran vakum, maka dapat terlihat bahwa hasil pengecoran yang paling sedikit mengalami porositas yaitu pada ketebalan 15 mm (paling tebal) dan memiliki kandungan tembaga 2.5%, maka duralumin paling ideal untuk dilakukan pengecoran adalah duralumin dengan ketebalan maksimal dan kandungan tembaga paling sedikit, hal ini mengacu pada data hasil perbandingan densitas teoritis dan densitas hasil eksperimen yang menghasilkan data kandungan porositas yang terlihat pada gambar 4.9, hasil pengecoran ideal tersebut hanya berdasarkan kandungan porositas yang terjadi dan mengabaikan faktor-faktor lainnya seperti kekuatan mekanis dan ketahanan korosi dari logam duralumin hasil pengecoran sistem vakum yang telah dilakukan penelitian tersebut.



## **BAB V**

### **KESIMPULAN**

1. Produk hasil pengecoran sistem vakum memiliki hasil yang minim porositas gas berukuran mikro, produk berukuran 5mm dan 7.5mm cenderung memiliki permukaan luar yang menyerupai cetakan, sedangkan pada produk berukuran 10mm-15mm terdapat cacat kerutan pada permukaannya dan bentuk produk tidak menyerupai cetakan
2. Kuantitas porositas gas pada produk akan berkurang seiring bertambahnya ketebalan produk yang mengakibatkan peningkatan waktu solidifikasi total, Duralumin dengan ketebalan 5 mm memiliki porositas rata-rata sebesar 13% sedangkan duralumin dengan ketebalan 15mm memiliki porositas rata-rata sebesar 8.5%.
3. Penambahan unsur Cu pada duralumin akan meningkatkan kuantitas dan ukuran porositas yang terjadi, Duralumin dengan kandungan tembaga 2.5% memiliki porositas rata-rata sebesar 10% dengan ukuran rata-rata sebesar 140 mikrometer sedangkan duralumin dengan kandungan tembaga 4.5% memiliki porositas rata-rata sebesar 12.5% dengan ukuran rata-rata sebesar 195 mikrometer.
4. Paduan duralumin yang memiliki kandungan porositas paling optimal untuk diproduksi melalui metode pengecoran sistem vakum adalah duralumin dengan ketebalan maksimal, dan kandungan tembaga minimal. Dalam eksperimen ini yaitu logam Al-2.5 Cu dengan ketebalan 15mm yang memiliki kandungan porositas gas sebesar 8.4%

## DAFTAR REFERENSI

- [1]. Das Subodh and Yin Weimin, Trends in the Global Aluminium Fabrication Industry, JOM, 2007, hal.83.
- [2]. M. Rosso, The Influence of Casting Process on Quality and Performances on Al Based Automotif Components, 13<sup>th</sup> International Scientific Conference on Achievements in Mechanical Science and Engineering, 2005, hal.547.
- [3]. Yu Guili and Zhao Xin. The casting process of large closed annular castings made of high strength Al-Cu alloy. Journal of Materials Engineering, 2000, (9): hal.42-45
- [4]. Marisa di Sabatino and Lars Arnberg, Castability of aluminium alloys, Transactions of The Indian Institute of Metals, Vol. 62, Issues 4-5, August-October 2009, hal.321-325.
- [5]. S.Shivkumar, D. Apelian, J.Zou, Modeling of Microstructure Evolution and Microporosity Formation in Cast Aluminum Alloys, Worcester Polytechnic Institute, Worcester, Massachusetts, 1990, hal.127
- [6]. Shakhashiri, Bassam Z.. "Chemical of the Week: Aluminum". Science is Fun. Retrieved 2007-08-28.
- [7]. I. J. Polmear, *Light Alloys*, Arnold, 1995
- [8]. Sumanth Shankar, D .A, Mechanism of The Interface Reaction Between Molten Aluminum Alloy and Tool Steel. Metallurgical and Material Transactions, 2002.
- [9]. R.E. Sanders, Technology Innovation in aluminium Products, *The Journal of The Minerals*,53, 2001, hal.21-25
- [10]. ASM Handbook. Volume 2, *In Properties and Selection: Nonferrous alloys and special purpose materials*. ASM, 2002.
- [11]. J. Dwight. *Aluminium Design and Construction*. Routledge, 1999.
- [12]. N.C.W. Kuijpers, Intermetallic phase transformations during homogenization Al alloys literature review, 2000, hal. 8-10.

- [13]. D.Apelian, Worldwide Report Aluminum Cast Alloys: Enabling Tools for Improved Performance, NADCA, 2009, hal.8-26
- [14]. Degarmo, E. P. Paul; Black, J. T.; Kohser, Ronald A., *Materials and Processes in Manufacturing* (9th ed.), Wiley, 2003, hal.277-328
- [15]. D.Apelian, The basis and Needs for Intelligent Materials Processing, Bulletin of the Materials Research Society, vol XIV(6), 1989
- [16]. M.Rappaz and Ph. Thevoz; Acta Metall., vol 35, 1987, hal 1487
- [17]. I. Dustin and W. Kurz; Z. Metallkde. Vol 77, 1986, hal 265
- [18]. J. Zhou, K. Tenelius, S. Shivkumar, and D. Apelian, "Microporosity Formation in A 356.2 Castings," Production, Refining, Fabrication and Recycling of Light Metals, Pergamon Press, New York, 1990, hal. 323-332
- [19]. J.L. John, L.Rasmussen, M. Wayne, Aluminum Casting Technology-2<sup>nd</sup> edition, American Foundry Society, 1993
- [20]. T. Soejono, G. Hendri, Analisa Pengaruh Bentuk Penampang Riser Terhadap Cacat Porositas, Jurusan Teknik Mesin, Universitas Kristen Petra, 2003, hal 1
- [21]. C. John, Castings, Butterworth-Heinemann, 2003, hal 77
- [22]. Yu, Kuang-Oscar, Modeling for casting and solidification processing, CRC Press, 2002, hal.305
- [23]. Gas Porosity in Aluminum Casting, Compiled AFS Literature, March 2002
- [24]. Roxburgh, William (1919), General Foundry Practice, Constable & Company, 1919, hal. 30–32
- [25]. Stefanescu, Doru Michael, Science and Engineering of Casting Solidification (2nd ed.), Springer, 2008, hal 69
- [26]. B. Gerald, W. Qigui, Microporosity Modeling In Aluminum Castings, TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), 2006. Hal 187-191
- [27]. M. Rappaz, Inter. Mat. Rev., vol 34. No. 3, 1989, hal 93-123

- [28]. W.S. Hwang and R. A. Stoehr; Metals Handbook. Volume 13. Ninth Edition, American Society for Metals, 1988, hal 867
- [29]. V.R. Voller, A.D. Brent and K.J. Reid, Solidification Processing, Rammoor House, Sheffield, U.K, 1987.
- [30]. J.T. Berry and R.D. Pehlke; Metals Handbook, Volume 15, Ninth Edition. American Society for Metals, 1988, hal 858
- [31]. J.A. Dantzig and S.C. Lu; Metall. Trans., vol 16B, 1985, hal 195
- [32]. Wahyono Suprpto, Bambang Soeharno, Johnny Wahyuadi Soedarsono, Dedi Priadi, Effect of Copper and Air BLocking on Porosity Defect of Duralumin Cast, IJMET. Volume 5. ISJNE. 2011,2010 hal 61-75
- [33]. Laboratorium Metalurgi Proses Departemen Metalurgi dan Material FTUI. 2010. *Modul Praktikum Pasir Cetak dan Pengecoran*. Laboratorium Metalurgi Proses Departemen Metalurgi dan Material FTUI : Depok
- [34]. R.Monroe, Porosity in Casting, Steel Founders, American Foundry Society, Crystal Lake, Illinois, 2005
- [35]. Meng Wang, Pietro Catalano, Gianluca Accarino, Prediction of High Reynolds Number Flow Over A Circular Cylinder Using LES With Wall Modeling , Center for Turbulence Research, 2001
- [36]. Wang, C. Coles, D. & Roshko, A. Experiments on flow past rough circular cylinders at large Reynolds numbers. *J. Wind Engg and Industrial Aerodynamics* 49, 1993, hal 351-368
- [37]. Rott, N. "Note on the history of the Reynolds number". *Annual Review of Fluid Mechanics* 22 (1), 1990, hal 1–11
- [38]. J.P Holman *Heat transfer*, McGraw-Hill, 2002, hal.207
- [39]. Theory of the Solidification of Castings", *Giesserei*, 1940, Vol 27, hal. 177-186
- [40]. Askeland, Donald R., and P hule, P radeep P . *Essentials of Materials Science and Engineering*. Thomson, Ontario, Canada: 2004.

- [41]. Groover, Mikell P. *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems*. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, NJ: 2010, hal. 223
- [42]. Clancy, L.J. *Aerodynamics*. Chapter 3, Pitman Publishing, London. 1975
- [43]. Batchelor, G. K. *An Introduction to Fluid Dynamics*. Cambridge University Press, 1967, Section 3.5, hal. 156–64
- [44]. Streeter, V. L. *Fluid Mechanics*, Example 3.5, McGraw–Hill Inc. New York. 1966
- [45]. Dan VanderBoon, Effect of Solidification Rate on Porosity Formation and Cast Microstructure in Aluminium Alloy A356, Ph.D. thesis, College of Engineering & Computing, Grand Valley State University, 2005
- [46]. John Campbell, Richard A. Harding. Solidification Defects in Castings, IRC in Materials, University of Birmingham, European Aluminium Association, 1994

## Lampiran. 1

Tabel.1 persentase kandungan unsur hasil *Optical Emission Spectroscopy*

Material	Unsur (%)											
	Al	Cu	Mn	Si	Mg	Zn	Fe	Sn	Pb	Ni	Cr	Ti
<b>Ingot Al</b>	99.5	0.006	0.108	0.28	0.008	0.005	0.001	0.01	0.002	0.023	0.029	0.001
<b>Skrup Cu</b>	0.02	98.5	0.003	0.245	0.001	0.28	0.358	0.005	0.005	0.1	0.002	0
<b>Duralumin 0,0%Cu</b>	99.5	0.006	0.108	0.28	0.008	0.005	0.001	0.01	0.002	0.023	0.029	0.001
<b>Duralumin 2,5% Cu</b>	96.05	2.495	0.086	0.346	0.161	0.045	0.572	0.112	0.012	0.005	0.005	0.0013
<b>Duralumin 3,0% Cu</b>	95.4	3	0.0098	0.29	0.179	0.073	0.758	0.105	0.008	0.005	0.012	0.01
<b>Duralumin 3,5% Cu</b>	96	3.49	0.106	0.145	0.0096	0.013	0.108	0.01	0.002	0.005	0.001	0.005
<b>Duralumin 4,0% Cu</b>	94.6	3.8	0.0756	0.508	0.304	0.26	0.345	0.01	0.026	0.005	0.001	0.013
<b>Duralumin 4,5% Cu</b>	92.8	4.49	0.072	0.696	0.222	0.268	1.32	0.013	0.032	0.005	0.001	0.017

## Lampiran. 2

**Tabel. 2 Data Properti Material Untuk Perhitungan Waktu Solidifikasi Total**

<b>Cu [%]</b>	<b>T<sub>m</sub> [K]</b>	<b>T<sub>o</sub> [K]</b>	<b>ΔT<sub>s</sub> [K]</b>	<b>L [J/gr]</b>	<b>k [W/cmK]</b>	<b>ρ [gr/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>c [J/grK]</b>	<b>ρ<sub>m</sub> [gr/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>c<sub>m</sub> [J/grK]</b>
2.5	923	573	50	396	0.54	7.85	0.49	2.855	0.897
3	920	573	53	396	0.54	7.85	0.49	2.886	0.894
3.5	917	573	56	396	0.54	7.85	0.49	2.917	0.891
4	914	573	59	396	0.54	7.85	0.49	2.948	0.889
4.5	911	573	62	396	0.54	7.85	0.49	2.979	0.886

**Tabel. 3 Dimensi Produk Hasil Pengecoran**

<b>Tebal (mm)</b>	<b>V</b>	<b>A</b>
5	9.8125	47.1
7.5	14.71875	51.025
10	19.625	54.95
12.5	24.53125	58.875
15	29.4375	62.8

### Lampiran. 3

**Tabel 4. Data Konstanta Mold dan Waktu Solidifikasi Total Produk 5mm**

Cu [%]	B[ $\text{min}/\text{cm}^2$ ]	$t=B(V/A)^2$ [s]
2.5	3.99403676	10.40113741
3	4.15822246	10.82870432
3.5	4.32909589	11.27368721
4	4.50712635	11.7373082
4.5	4.69229862	12.21952764

**Tabel 5. Data Konstanta Mold dan Waktu Solidifikasi Total Produk 7.5mm**

Cu[%]	B[ $\text{min}/\text{cm}^2$ ]	$t=B(V/A)^2$ [s]
2.5	3.99403676	19.94064213
3	4.15822246	20.76035621
3.5	4.32909589	21.6134595
4	4.50712635	22.50229501
4.5	4.69229862	23.42678673

**Tabel 6. Data Konstanta Mold dan Waktu Solidifikasi Total Produk 10mm**

Cu[%]	B[ $\text{min}/\text{cm}^2$ ]	$t=B(V/A)^2$ [s]
2.5	3.99403676	30.56660789
3	4.15822246	31.82313107
3.5	4.32909589	33.13083588
4	4.50712635	34.49331389
4.5	4.69229862	35.91044859

**Tabel 7. Data Konstanta Mold dan Waktu Solidifikasi Total Produk 12.5mm**

<b>Cu[%]</b>	<b>B[<math>\text{min}/\text{cm}^2</math>]</b>	<b><math>t=B(V/A)^2</math> [s]</b>
2.5	3.99403676	41.60454963
3	4.15822246	43.31481729
3.5	4.32909589	45.09474883
4	4.50712635	46.9492328
4.5	4.69229862	48.87811058

**Tabel 8. Data Konstanta Mold dan Waktu Solidifikasi Total Produk 15mm**

<b>Cu[%]</b>	<b>B[<math>\text{min}/\text{cm}^2</math>]</b>	<b><math>t=B(V/A)^2</math> [s]</b>
2.5	3.99403676	52.65575812
3	4.15822246	54.82031563
3.5	4.32909589	57.07304149
4	4.50712635	59.42012276
4.5	4.69229862	61.8613587

## Lampiran. 4

Tabel. 9 Data Hasil Perhitungan Kecepatan Aliran Logam Cair

Cu (wt%)	$\Delta P$ (atm)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$g$ (m/s <sup>2</sup> )	$h$ (m)	$V$ (m/s)
2.5	1315.8	2855	9.8	0.092	1.65074266
3	1315.8	2886	9.8	0.092	1.64774097
3.5	1315.8	2917	9.8	0.092	1.64479778
4	1315.8	2948	9.8	0.092	1.64191139
4.5	1315.8	2979	9.8	0.092	1.63908013

Tabel. 10 Data Hasil Perhitungan Bilangan Reynold

Al (wt%)	$V$ (m/s)	$D$ (m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\mu$ (Pa · s)	Re
2.5	1.65074266	0.04	2855	0.013	14501.1394
3	1.64774097	0.04	2886	0.013	14631.9398
3.5	1.64479778	0.04	2917	0.013	14762.6927
4	1.64191139	0.04	2948	0.013	14893.3993
4.5	1.63908013	0.04	2979	0.013	15024.0606

## Lampiran. 5

Tabel. 11 Data Hasil Pengujian Densitas Al -2.5Cu

Al -2.5Cu Densitas Teoritis : 2.855 gr/cm <sup>3</sup>							
Tebal (mm)	Wa	Ws	Wfz	Wwk	Wk	Ysp	Porositas %
5	28.6	228.16	207.1	21.06	3.86	2.508772	12.12707776
5	28.6	228.16	207.13	21.03	3.86	2.502187	12.35771536
5	28.6	228.16	206.99	21.17	3.86	2.533215	11.27091997
Rata-rata							11.91857103
7.5	38.39	228.16	201.05	27.11	3.86	2.535667	11.18504003
7.5	38.39	228.16	201.02	27.14	3.86	2.540702	11.00870325
7.5	38.39	228.16	201.35	26.81	3.86	2.486399	12.91071931
Rata-rata							11.70148753
10	49.41	228.16	194.03	34.13	3.86	2.581505	9.579520063
10	49.41	228.16	194.9	33.26	3.86	2.469265	13.51084528
10	49.41	228.16	194.21	33.95	3.86	2.557453	10.42194689
Rata-rata							11.17077075
12.5	58.03	228.16	188.91	39.25	3.86	2.563163	10.22197744
12.5	58.03	228.16	188.64	39.52	3.86	2.594099	9.138380383
12.5	58.03	228.16	188.82	39.34	3.86	2.573392	9.863661604
Rata-rata							9.741339808
15	69.32	228.16	181.38	46.78	3.86	2.625758	8.029506979
15	69.32	228.16	181.54	46.62	3.86	2.60994	8.583546093
15	69.32	228.16	181.61	46.55	3.86	2.603079	8.823844695
Rata-rata							8.478965922

## Lampiran. 6

Tabel. 12 Data Hasil Pengujian Densitas Al -3Cu

Al -3Cu Densitas Teoritis : 2.886 gr/cm <sup>3</sup>							
Tebal (mm)	Wa	Ws	Wfz	Wwk	Wk	Ysp	Porositas %
5	28.67	228.16	206.82	21.34	3.86	2.562109	11.22283347
5	28.67	228.16	206.98	21.18	3.86	2.525991	12.47431776
5	28.67	228.16	207.12	21.04	3.86	2.495213	13.54077516
Rata-rata							12.41264213
7.5	38.32	228.16	200.96	27.2	3.86	2.558077	11.36252818
7.5	38.32	228.16	201.02	27.14	3.86	2.547872	11.71613512
7.5	38.32	228.16	201.03	27.13	3.86	2.546179	11.7747955
Rata-rata							11.6178196
10	49.62	228.16	194.03	34.13	3.86	2.564341	11.14549254
10	49.62	228.16	194.22	33.94	3.86	2.539406	12.00948212
10	49.62	228.16	193.78	34.38	3.86	2.597906	9.982475428
Rata-rata							11.0458167
12.5	58.32	228.16	188.12	40.04	3.86	2.634146	8.726737995
12.5	58.32	228.16	188.55	39.61	3.86	2.583961	10.46566146
12.5	58.32	228.16	188.34	39.82	3.86	2.608229	9.624775457
Rata-rata							9.605724971
15	69.39	228.16	181.12	47.04	3.86	2.647463	8.265322229
15	69.39	228.16	181.24	46.92	3.86	2.635397	8.683406595
15	69.39	228.16	181.39	46.77	3.86	2.620468	9.20068337
Rata-rata							8.716470731

## Lampiran. 7

Tabel. 13 Data Hasil Pengujian Densitas Al-3.5Cu

Al- 3.5Cu Densitas Teoritis : 2.917 gr/cm <sup>3</sup>							
Tebal (mm)	Wa	Ws	Wfz	Wwk	Wk	Ysp	Porositas %
5	28.89	228.16	207.1	21.06	3.86	2.471343	15.27792156
5	28.89	228.16	207.03	21.13	3.86	2.486231	14.76754759
5	28.89	228.16	206.89	21.27	3.86	2.516551	13.72812744
Rata-rata							14.59119886
7.5	39.09	228.16	200.75	27.41	3.86	2.515444	13.76606049
7.5	39.09	228.16	200.42	27.74	3.86	2.57002	11.89510717
7.5	39.09	228.16	200.65	27.51	3.86	2.531736	13.20755052
Rata-rata							12.95623939
10	50.02	228.16	193.74	34.42	3.86	2.570401	11.88204243
10	50.02	228.16	193.61	34.55	3.86	2.587688	11.28942296
10	50.02	228.16	193.66	34.5	3.86	2.581011	11.51829442
Rata-rata							11.56325327
12.5	58.13	228.16	188.11	40.05	3.86	2.649499	9.170427404
12.5	58.13	228.16	188.32	39.84	3.86	2.624379	10.03156556
12.5	58.13	228.16	188.41	39.75	3.86	2.613759	10.39564646
Rata-rata							9.865879809
15	69.47	228.16	180.98	47.18	3.86	2.656597	8.927097761
15	69.47	228.16	181.03	47.13	3.86	2.651527	9.100901009
15	69.47	228.16	180.91	47.25	3.86	2.663727	8.682653621
Rata-rata							8.903550797

## Lampiran. 8

Tabel. 14 Data Hasil Pengujian Densitas Al-4Cu

Al-4Cu Densitas Teoritis : 2.948 gr/cm <sup>3</sup>							
Tebal (mm)	Wa	Ws	Wfz	Wwk	Wk	Ysp	Porositas %
5	28.82	228.16	207.22	20.94	3.86	2.454855	16.72811411
5	28.82	228.16	207.08	21.08	3.86	2.484483	15.72310859
5	28.82	228.16	206.81	21.35	3.86	2.543689	13.7147449
Rata-rata							15.38865587
7.5	38.39	228.16	200.96	27.2	3.86	2.550831	13.47250459
7.5	38.39	228.16	201.12	27.04	3.86	2.523997	14.3827215
7.5	38.39	228.16	200.63	27.53	3.86	2.608016	11.53268981
Rata-rata							13.1293053
10	49.79	228.16	194.13	34.03	3.86	2.537717	13.91734682
10	49.79	228.16	193.22	34.94	3.86	2.661144	9.730536859
10	49.79	228.16	193.48	34.68	3.86	2.624671	10.9677567
Rata-rata							11.53854679
12.5	58.37	228.16	187.92	40.24	3.86	2.654388	9.959689337
12.5	58.37	228.16	187.45	40.71	3.86	2.712361	7.993195563
12.5	58.37	228.16	187.31	40.85	3.86	2.730122	7.390718827
Rata-rata							8.447867909
15	69.52	228.16	180.71	47.45	3.86	2.681064	9.054803115
15	69.52	228.16	180.99	47.17	3.86	2.652423	10.02636569
15	69.52	228.16	180.14	48.02	3.86	2.741325	7.010687885
Rata-rata							8.697285564

## Lampiran. 9

Tabel. 15 Data Hasil Pengujian Densitas Al-4.5Cu

Al- 4.5Cu Densitas Teoritis : 2.979 gr/cm <sup>3</sup>							
Tebal (mm)	Wa	Ws	Wfz	Wwk	Wk	Ysp	Porositas %
5	29.19	228.16	206.83	21.33	3.86	2.490614	16.39428216
5	29.19	228.16	206.33	21.83	3.86	2.601604	12.66853716
5	29.19	228.16	206.89	21.27	3.86	2.477929	16.82011773
Rata-rata							15.29431235
7.5	39.17	228.16	199.81	28.35	3.86	2.668256	10.431147
7.5	39.17	228.16	200.37	27.79	3.86	2.57021	13.72239094
7.5	39.17	228.16	200.24	27.92	3.86	2.592323	12.98009517
Rata-rata							12.37787771
10	50.11	228.16	193.34	34.82	3.86	2.61671	12.16145744
10	50.11	228.16	193.44	34.72	3.86	2.603117	12.61776156
10	50.11	228.16	193.12	35.04	3.86	2.647121	11.1406186
Rata-rata							11.9732792
12.5	58.16	228.16	187.97	40.19	3.86	2.664224	10.56651408
12.5	58.16	228.16	187.66	40.5	3.86	2.702602	9.278206429
12.5	58.16	228.16	187.81	40.35	3.86	2.683895	9.906183772
Rata-rata							9.916968094
15	69.61	228.16	180.12	48.04	3.86	2.737318	8.11285236
15	69.61	228.16	180.31	47.85	3.86	2.717018	8.794294907
15	69.61	228.16	180.46	47.7	3.86	2.701203	9.32517794
Rata-rata							8.744108402