



UNIVERSITAS INDONESIA

**POROSITAS GAS PADA MATERIAL DURALUMIN
DALAM PENGECORAN SISTEM VAKUM**

DISERTASI

**NAMA : WAHYONO SUPRAPTO
NPM : 0806401052**

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

Universitas Indonesia



UNIVERSITAS INDONESIA

**POROSITAS GAS PADA MATERIAL DURALUMIN
DALAM PENGECORAN SISTEM VAKUM**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Doktor bidang Metalurgi dan Material**

**NAMA : WAHYONO SUPRAPTO
NPM : 0806401052**

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

Universitas Indonesia

PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Wahyono Suprpto

NPM : 0806401052

Tanda Tangan :



Tanggal : 8 Juli 2011

LEMBAR PENGESAHAN

Disertasi ini diajukan oleh :

Nama : Wahyono Suprpto

NPM : 0806401052

Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material

**Judul Disertasi : Porositas Gas pada Material Duralumin dalam
Pengecoran Sistem Vakum**

Telah dipertahankan di hadapan Dewan Penguji Ujian Promosi dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Doktor pada Program Studi Teknik Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Promotor : Prof.Dr.-Ing.Ir. Bambang Suharno ()

Ko-Promotor : Prof.Dr.Ir. Johny Wahyuadi Soedarsono,DEA ()

Ko-Promotor : Dr.Ir.Dedi Priadi, DEA ()

Ketua Penguji : Prof.Dr.-Ing.Ir. Bambang Suharno ()

Penguji : Prof.Dr.Ir. Johny Wahyuadi Soedarsono,DEA ()

Penguji : Dr.Ir.Dedi Priadi, DEA ()

Penguji : Prof.Dr.Ir. Budiarmo, M.Eng. ()

Penguji : Prof.Dr.Ir. Bondan T Sofyan, M.Si. ()

Penguji : Dr.Ir. I Nyoman Jujur, M.Eng. ()

Penguji : Dr.Ir.Barman Tambunan, MSc.Eng ()

Ditetapkan di : Jakarta

Tanggal : 11 Juli 2011

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji Syukur ke hadirat Allah SWT, yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga saya dapat menyelesaikan program Doktor di Program Studi Teknik Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia. Pada kesempatan ini perkenankan saya menyampaikan rasa terimakasih dan hormat kepada:

1. Prof.Dr.-Ing.Ir. Bambang Suharno, Prof.Dr.Ir. Johny Wahyuadi Soedarsono, DEA, Dr.Ir.Dedi Priadi, DEA, selaku Promotor dan Ko-Promotor yang telah bersedia meluangkan waktu untuk memberi pengarahan, diskusi dan bimbingan.
2. Dewan penguji yang terdiri dari Ketua Prof.Dr.-Ing.Ir. Bambang Suharno, Anggota; Prof.Dr.Ir. Johny Wahyuadi Soedarsono., Dr.Ir.Dedi Priadi, DEA., Prof.Dr.Ir. Budiarmo., M.Eng, Prof.Dr.Ir. Bondan T Sofyan., M.Si, Dr.Ir. I Nyoman Jujur., M.Eng, Dr.Ir. Barman Tambunan., MSc.Eng, atas kesediaannya untuk menguji serta telah banyak memberikan masukan dan arahan yang sangat berharga demi penyempurnaan disertasi ini.
3. Rektor Universitas Brawijaya beserta jajarannya, Dekan Fakultas Teknik Universitas Brawijaya beserta jajarannya, Ketua Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya beserta jajarannya yang telah memberikan beasiswa untuk program doktor.
4. Dekan Fakultas Teknik Universitas Indonesia beserta jajarannya, Departemen Teknik Metalurgi Universitas Indonesia beserta jajarannya yang telah memperkenankan saya mengikuti pendidikan program doktor.
5. Kedua orang tua saya Bapak Bardjo Atmodjo (alm) dan Ibu W. Marpungah (almh) yang telah melahirkan, mendidik, membimbing, dan menyayangi sehingga putramu dapat menyelesaikan pendidikan doktor di Universitas Indonesia. Kedua mertua saya Bapak Sukardi (alm) dan ibu Sulastri (almh) yang penuh perhatian terhadap keluarga saya.
6. Dosen-dosen saya di; Pasca Sarjana Departemen Teknik Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Jurusan Teknik Mesin ATNAS Yogyakarta. Guru-guru saya di; STM Bersubsidi Cilacap, SMPN 2 Cilacap, SDN 1 Cilacap, TK Persit Cilacap yang telah mendidik dan membimbing saya. Semoga Allah SWT melimpahkan rahmat dan hidayahNya kepada beliau semua.
7. Saudaraku, mbak Siti Sumarni, mbak Siti Sumardinah, mbak Duksinarti, mbak Siti Mulyani (almh), mbak Siti Akhiratinah (almh), mbak Sabar Minatun, mbak Mujijatun, adik Budi Basuki SE, adik Wahyugo Iman Santoso SH (alm) dan adik Dwi, adik Endang Sugiarti dan adik Supri yang selalu mendoakan saya. Tak lupa kepada Saudaraku yang tercinta, mbak Trikardiningsih, mas Trikardiyono dan mbak Eli, adik Trikardiana dan om Slamet, adik Trikardiastuti, adik Trikardianto, adik

Trikardihariyoso, adik Trikardisetiadi dan adik Upi yang selalu mendoakan saya.

8. Keluarga besar Luwih Sanyoto, bapak Lilik Prisbawono Adi, SH dan ibu Herti Purba, SIP., DR. Ahmad Julfikri, Drg Dijah Rahmawati, dan abang Rafi Aldi, atas segala pengertian dan kebersamaannya selama ini.
9. Manajer dan Staf CMPFA DTMM-FTUI, Kepala dan Staf Lab.Metalografi DTMM-FTUI, Kepala dan Staf Lab.Metalografi Departemen Fisika-FMIPAUI, Kepala dan Staf Lab. Uji Material Jurusan T.Mesin-FTUB yang telah melakukan pengujian spesimen sebagai data penelitian.
10. Dr. Bambang Soegijono, DEA. dengan pengujian SEM dan XRD, Deni Ferdian, ST. MSc. dengan simulasi Z-Cast. Ahmad Zakiyuddin ST, dengan SEM dan EDX. Andik Budi Prasetyo, Reza Septian, ST., Abdurahman Alatas, ST. yang membantu penelitian saya.
11. Dr. Anindito Purnowidodo, ST. M.Eng., Dr. Yudi Suryawan, ST. M.Eng. yang telah berbagi pengalaman. Ir. Soeparno Djiwo, MT. yang telah berkenan memberikan bimbingan skripsi tugas akhir mahasiswa ITN-Malang.
12. Teman satu angkatan program S3 Departemen Teknik Metalurgi dan Material, bapak; Sugiarto, Andi Rustandi, Agus edy Pramono, Patuan Alfon S., Abdul Hay, Richard A.M. Napitupulu, dan ibu; Yunita Sadeli, Nanik Indrayaningsih, Rini Riastuti atas kebersamaannya selama ini. Dr. Myrna Ariati, Dr. Riyanti Sulamet Ariobimo atas saran dan dukungannya.
13. Sahabat-sahabat saya di SDN 1 Cilacap, SMPN 2 Cilacap, STM Bersubsidi Cilacap, S-1 Mesin FTUB, S-2 Metalurgi FTUI yang hadir ditengah-tengah kebahagiaan saya di sidang Promosi Doktor.
14. Akhirnya sampai kepada anak dan cucu yang saya cintai; Yudistira Atmaja dan Siti Zaenab Farah Dina, Aditya Sukardi dan Amarillia Yudianti, Abby Fidela Fitri, Karania Dahayu Adianti, dan Bisma Aditama atas segala doa, perhatian dan kerinduannya selama ini.
15. Istriku tercinta Ir. Trikardiani atas kasih sayang, pengertian, pengorbanan, kesetiaan serta kesabarannya untuk selalu mendoakan, mendorong dan memberikan semangat yang tiada henti semenjak saya mahasiswa S1 sampai menyelesaikan pendidikan doktor.

16. Semua pihak yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu.

Semoga Disertasi ini bermanfaat bagi pengembangan keilmuan bidang rekayasa material teknik.

Akhir kata, semoga Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas budi baik yang telah diberikan oleh semua pihak. Amien.

Depok, Juli 2011

Peneliti

Universitas Indonesia

PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : Wahyono Suprpto
NPM : 0806401052
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Departemen : Metalurgi dan Material
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Disertasi

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 pada Material Duralumin dalam 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 : Jakarta
Pada tanggal : 11 Juli 2011
Yang menyatakan



(Wahyono Suprpto)

ABSTRAK

Nama : Wahyono Suprpto
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul : Porositas Gas pada Material Duralumin dalam Pengecoran Sistem Vakum

Porositas merupakan cacat yang sering terjadi dalam pengecoran paduan aluminium yang sulit dihindari, tetapi porositas dalam produk cor harus dibuat sekecil mungkin. Ketidaksiuaian proses pengecoran sering menimbulkan porositas yang mengakibatkan kualitas produk turun atau produk harus di daur ulang. Umumnya, porositas dalam paduan aluminium disebabkan oleh hidrogen larut dan terjebak, atau *feeding* yang kurang. Selama ini porositas dicegah dengan proses *degassing* konvensional seperti; *fluxing*, *injecting*, *pressing*, dan *partial vacuuming* tetapi belum memberikan hasil yang optimal. Pengecoran duralumin dengan *vacuuming* tekanan rendah yang terintegrasi, yang disebut pengecoran sistem vakum, sampai sekarang belum pernah dilakukan dan diteliti oleh praktisi dan ilmuwan.

Penelitian porositas pada paduan Al-Cu (duralumin) dilakukan dengan membuat ingot duralumin dari aluminium dan tembaga dalam tungku reverberatory. Selanjutnya dilakukan pembuatan spesimen dengan melebur ulang ingot duralumin, menuang, dan membekukannya dalam tungku pengecoran sistem vakum. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah kontrol parameter proses pengecoran dengan variasi penambahan tembaga 2,5%Cu sampai 4,5%Cu dan variasi tekanan vakum *melting* 0,789 kg/cm² sampai 0,263 kg/cm². Suhu peleburan dan penuangan duralumin (700 °C), waktu *holding* duralumin *melt* (15 menit), tekanan solidifikasi 10 cmHg lebih kecil dari tekanan *melting*, dan *preheating* cetakan (300 °C) merupakan parameter kontrol pengecoran. Sebagai variabel terikatnya adalah kualitas duralumin cor yang terdiri dari; berat jenis, kuantitas dan morfologi porositas, dan senyawa dalam duralumin. Instrumen uji yang digunakan adalah *optical emission spectrometry*, *Picnometer*, *optic* dan *scanning electron microscope*, *X-ray diffraction*.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa bertambahnya kandungan tembaga dan tingkat kevakuman menyebabkan berat jenis duralumin meningkat. Kenaikan paduan tembaga menyebabkan porositas bertambah dari 16,67% sampai 21,20%. Hasil penelitian pengecoran tekanan vakum menyebabkan porositas turun dari 20,35% sampai 15,56%, dan jenis porositas yang terjadi adalah porositas gas. Dalam duralumin terjadi fasa metalik; Al₂Cu, Al₈Si₆Mg₃Fe dan fasa inklusi *non-metallic*; Al₂O₃, Al₄C₃. Pengecoran duralumin yang optimal dicapai pada penambahan tembaga 3,35%Cu dan tekanan vakum 0,566kg/cm² dengan jumlah porositas 17,5%.

Kata kunci:

Degassing, porositas, duralumin, vakum

ABSTRACT

Name : Wahyono Suprpto
 Study Program : Metallurgy and Materials
 Title : Gas Porosity of Duralumin Material on Vacuum Casting System

Porosity is a defect that often happens in aluminum casting that is difficult to avoid, but porosity on casting product must be minimized as much as possible. Improper casting process often creates porosity which decreases product quality, or the product must be recycled. Generally porosity in aluminum mixture caused by dissolved and trapped hydrogen, or inadequate feeding. Until now, porosity is avoided by using conventional degassing process such as: fluxing, injecting, pressing, and partial vacuuming, but those have not been giving optimal result. Duralumin casting with integrated low pressure vacuuming which called vacuum system casting have never been done by practitioners and scientists.

Porosity research on Al-Cu mixture (duralumin) is done by making duralumin ingot from aluminum and copper in reverberatory furnace. Next, specimen creation is done by remelting ingot duralumin, pouring, and solidifying it in the vacuum system casting furnace. Independent variable in this research is parameter control of casting process with copper additional variation from 2,5%Cu up to 4,5%Cu and variation of vacuum pressure melting $0,789 \text{ kg/cm}^2$ up to $0,263 \text{ kg/cm}^2$. Melting temperature and duralumin pouring ($700 \text{ }^\circ\text{C}$), holding time of duralumin melt (15 minutes), solidification pressure 10 cmHg smaller than melting pressure, and preheating print ($300 \text{ }^\circ\text{C}$) are casting parameter controls. As the dependent variable is cast duralumin quality which consists of: density, quantity, and porosity morphology, and compound in duralumin. Testing instrument used are optical emission spectrometry, Picnometer, optic and scanning electron microscope, and X-ray diffraction.

Research result shows that the increment of copper content and vacuum level cause duralumin density increases. However, the increment of copper mixture cause porosity increases from 16,67% until 21,20%. Result of vacuum pressure casting cause porosity decrease from 20,35% until 15,56% and porosity that happens is gas porosity. Metallic phase; Al_2Cu , $\text{Al}_8\text{Si}_6\text{Mg}_3\text{Fe}$ and inclusion phase non-metallic; Al_2O_3 , Al_4C_3 is heppen in the duralumin. An optimum duralumin casting is reahed at copper addition of 3,35%Cu and vacuum pressure $0,566 \text{ kg/cm}^2$, with porosity level at 17,5%.

Keywords :

Degassing, porosity, duralumin, vacuum

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
UCAPAN TERIMA KASIH	iv
PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR SINGKATAN	xiii
DAFTAR ISTILAH/SIMBOL	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xv
BAB I PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	6
1.3. <i>Road Map</i> Penelitian	7
1.4. Aspek Kebaruan	12
1.5. Batasan Masalah	12
1.6. Hipotesis	13
1.7. Tujuan Penelitian	14
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1. Unsur Paduan Aluminium	15
2.2. Mekanisme Cacat Dalam Cetakan	19
2.3. Proses Solidifikasi Dalam Pengecoran Duralumin	22
2.4. Diagram Fasa Paduan Al–Cu	24
2.5. Material Duralumin (Paduan Al–Cu)	27
2.6. Morfologi Porositas Dalam Duralumin Cor	30
2.6.1. Definisi dan Identifikasi	30
2.6.2. Mekanisme Pembentukan Porositas	32
2.7. Simulasi Porositas Dalam Pengecoran Duralumin	40
BAB III METODE PENELITIAN	
3.1. Rancangan Penelitian	46
3.2. Prosedur Pengecoran dan Pengujian	57
3.3. Peralatan Pengecoran dan Penelittian	62
BAB IV DATA DAN PEMBAHASAN	
4.1. Rancang Bangun Tungku Pengecoran Sistem Vakum	65
4.2. Simulasi Cetakan Permanen (Z-Cast)	67
4.2.1. Pengaruh Parameter Proses Pengecoran terhadap Hasil Simulasi	68
4.2.2. Hasil Modifikasi desain cetakan	73
4.2.3. Desain <i>Gating System</i>	76
4.3. Kuantitas Porositas Duralumin	78

4.3.1. Pengaruh Proses Pengecoran terhadap Berat Jenis Duralumin	83
4.3.2. Pengaruh Tekanan Vakum dan Penambahan Tembaga terhadap Porositas Duralumin	86
4.3.3. Pengaruh Tebal Cor Duralumin terhadap Porositas Duralumin	89
4.4. Pengaruh Parameter Pengecoran terhadap Mikrostruktur Duralumin	97
4.4.1. Pengaruh Tembaga dan Derajat Vakum Terhadap Makrostruktur Duralumin	98
4.4.2. Pengaruh Tembaga Terhadap mikrostruktur Duralumin	101
4.4.3. Pengaruh Jenis Proses Terhadap Mikrostruktur Duralumin	104
4.4.4. Pengaruh Tekanan Vakum Terhadap Mikrostruktur Duralumin	106
4.5. Fasa-Fasa Dalam Duralumin	109
4.5.1. Pengaruh Tembaga Terhadap Fasa Inklusi Duralumin	110
4.5.2. Pengaruh Tekanan Pengecoran Terhadap Fasa Inklusi Duralumin	112
4.5.3. Pengaruh Tebal Cor Terhadap Fasa Inklusi Duralumin	114
4.6. Simulasi Analitik Pembentukan Porositas	117
BAB V KESIMPULAN	123
DAFTAR REFERENSI	126
LAMPIRAN	133



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Diagram <i>fishbone</i> dari <i>road map</i> penelitian	11
Gambar 2.1. Hubungan kandungan gas, porositas Vs kekuatan	18
Gambar 2.2. Pembentukan <i>shrinkage</i> akibat <i>feeder</i> yang salah	20
Gambar 2.3. Diagram fasa paduan Al-Cu	25
Gambar 2.4. Porositas dalam coran logam	31
Gambar 2.5. Mekanisme penyerapan hidrogen dalam aluminium	35
Gambar 2.6. Konstraksi dalam proses solidifikasi logam	36
Gambar 2.7. Cacat porositas pada pengecoran paduan aluminium	37
Gambar 2.8. Hidrogen larut dalam aluminium <i>melt</i>	39
Gambar 2.9. Mekanisme solidifikasi pengecoran	42
Gambar 3.1. Diagram alir penelitian disertasi	46
Gambar 3.1a. Diagram alir penelitian disertasi (lanjutan)	47
Gambar 3.2. Skema pengecoran sistem vakum	48
Gambar 3.3. Tungku pengecoran sistem vakum	49
Gambar 3.4. Pengecoran duralumin	50
Gambar 3.5. Sistem proses HIP	52
Gambar 3.6. Cetakan spesimen	53
Gambar 3.7. Spesimen duralumin cor	54
Gambar 4.1. Karakteristik tungku PSV	65
Gambar 4.2. Cacat porositas pada produk cor	67
Gambar 4.3. Simulasi Z-Cast desain produk awal	69
Gambar 4.4. Modifikasi <i>runner</i> dalam simulasi Z-Cast	73
Gambar 4.5. Modifikasi <i>sprue</i> dalam simulasi Z-Cast	75
Gambar 4.6. Geometri <i>Casting product</i>	76
Gambar 4.7. Bentuk produk <i>casting</i> dalam aneka pandang	77
Gambar 4.8. Penambahan tembaga versus berat jenis	85
Gambar 4.9. Hidrogen larut dalam aluminium <i>melt</i>	87
Gambar 4.10. Karakteristik PSV duralumin cor	89
Gambar 4.11. Karakteristik duralumin pada <i>as-cast</i>	90
Gambar 4.12. Kandungan tembaga vs porositas	91
Gambar 4.13. Distribusi porositas dalam duralumin	98
Gambar 4.14. Komparasi porositas dalam duralumin	99
Gambar 4.15. Mikrostruktur <i>as-cast</i> duralumin tebal 7,5mm	101
Gambar 4.16. Komparasi mikrostruktur Al-4.5Cu	104
Gambar 4.17. Komparasi mikrostruktur Al-4.5Cu tebal 10mm	106
Gambar 4.18a. Makro porositas (SEM)	107
Gambar 4.18b. Mikro porositas duralumin pada PSV	107
Gambar 4.19. Difraktogram <i>casting product</i> tekanan peleburan 1kg/cm ²	111
Gambar 4.20. Difraktogram Duralumin a). Al-2.5Cu, b). Al-3.0Cu	112
Gambar 4.21. Difraktogram Duralumin a). Al-4,0Cu b). Al-4,5Cu	113
Gambar 4.22. XRD duralumin hasil PSV	116
Gambar 4.23. Sistem kesetimbangan dalam cetakan	119
Gambar 4.24. Skema aliran duralumin <i>melt</i> dalam <i>cavity</i> cetakan	120
Gambar 4.25. Atomisasi dalam <i>die-casting</i>	120

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1. Data penelitian disertasi	56
Tabel 4.1. Faktor jarak pengisian	69
Tabel 4.2. Unsur minor dalam duralumin	78
Tabel 4.3. Unsur utama duralumin	79
Tabel 4.4. Densitas teoritis material bahan baku dan duralumin	82
Tabel 4.5. Butir mikrostruktur duralumin	102
Tabel 4.6. Data material cair	118
Tabel 4.7. Data material solid (temperatur ruang)	118
Tabel 4.8. Dimensi spesimen <i>Casting Product</i>	121



DAFTAR SINGKATAN

AA	: <i>Aluminum Association</i>
dkk	: dan kawan-kawan
EDS	: <i>Energy Dispersive Spectrometry</i>
HIPing	: <i>hot isostatic pressing</i>
JMT	: juta metric ton
MB	: <i>mass balance</i>
MC	: modulus cor
MPa	: Mega Pascal
OES	: <i>optical emission spectrometry</i>
OM	: <i>optic microscopy</i>
PDAS	: <i>primary dendrite arm spacing</i>
PDFS	: <i>powder diffraction file standards</i>
PSV	: pengecoran sistem vakum
SDAS	: <i>secondary dendrite arm spacing</i>
SEM	: <i>scanning electron microscopy</i>
STL	: <i>Stereolitography</i>
XRD	: <i>X-ray diffraction</i>
YS	: <i>yield strength</i>
2-D	: <i>two-dimensional</i>
3-D	: <i>three-dimensional</i>



DAFTAR ISTILAH/SIMBOL

As	: luas permukaan benda cor
c	: panas jenis
CF(A)	: faktor koreksi untuk komposisi paduan
CF(T)	: faktor koreksi untuk temperatur <i>melt</i>
Cr	: chromium
Cu	: tembaga
Fe	: besi
g	: percepatan gravitasi
G	: gradien temperatur
h	: energi elevasi
H _f	: panas laten solidifikasi
H ₂	: gas hidrogen
k	: konduktivitas panas benda cor
Mg	: magnesium
Mn	: manganese
N	: bilangan Niyama
O	: perlakuan panas <i>annealing</i>
O ₂	: gas oksigen
P	: porositas
p _{H₂O}	: tekanan uap air
q	: nilai kalor
Re	: bilangan Reynold
S	: luas permukaan pendinginan
Si	: silicon
t	: waktu
T	: <i>solution treatment + water quench + artificial aging</i>
T4	: <i>solution treatment + water quench + natural aging</i>
$\overset{o}{T}$: laju pendinginan
ΔT	: Kenaikan suhu
v	: kecepatan
V, Q	: Volume
W _a	: berat spesimen diudara
W _s	: berat awal spesimen
W _k	: berat keranjang dalam air
Zn	: zinc
A	: difusitas
ε	: regangan
ρ	: densitas benda cor
μ	: viskositas dinamis
1xx.x	: aluminium murni
2xx.x	: paduan Al–Cu
3xx.x	: paduam Al–Si–Mg atau paduan Al–Si–Cu
4xx.x	: paduam Al–Si
5xx.x	: paduam Al –Mg

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Karakteristik Tungku PSV	133
Lampiran 2. Data Uji <i>Picnometry</i>	135
Lampiran 3. Bentuk Porositas dan Mikrostruktur Dendrit	142
Lampiran 4. <i>Powder Diffraction File (PDF) Standar</i>	149
Lampiran 5. Data Uji XRD Spesimen Duralumin Cor	157
Lampiran 6. Data Sudut 2θ	169



BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Beberapa dasawarsa ini pemakaian paduan aluminium tidak terbatas pada industri peralatan rumah tangga, *automotive*, *aerospace*, tetapi mulai banyak digunakan dalam industri perminyakan, seperti; pipa *cryogenic* dan tanki bahan bakar (cair dan propelan). Das dan Yin, Dzioubinski dan Chipman [1,2] melaporkan produksi (*primary*) dan daur ulang (*secondary*) aluminium untuk memenuhi kebutuhan industri manufaktur di dunia cenderung terus meningkat khususnya di industri otomotif, tahun 1977 dihasil 15,8 juta metric ton (JMT), tahun 1997 bertambah menjadi 29,3 JMT, dan tahun 2009 diproduksi 67,8 JMT. Menurut Suharno [3], pengecoran paduan aluminium (komponen otomotif) di Indonesia kapasitas produksi terpasang mencapai 200.000 ton per tahun. Besarnya kebutuhan tersebut disebabkan mampu tuang paduan aluminium baik dan konduktivitas termalnya tinggi sehingga dapat diproduksi secara cepat (*on-line*). Tetapi kompleksitas geometri (bentuk dan dimensi) sering menimbulkan cacat pengecoran khususnya pada paduan aluminium dengan mampu tuang rendah seperti, duralumin. Analisa deduksi dan eksperimental pengecoran sistem vakum (PSV) merupakan salah satuantisipasi cacat. Kondisi hidrodinamika *pouring basin* sampai *riser* digambarkan dengan kesetimbangan energi menyeluruh (pers. Bernoulli) mampu menunjukkan kondisi riil rongga cetakan. Keberadaan dan fungsi belokan (*knee, elbow*), katup (divergen, konvergen), dan reservoir yang terdapat dalam sistem hidrodinamika digantikan oleh *gating system* dan *riser* dalam pengecoran logam (cetakan). Selama ini analisa analitik perilaku hidrodinamika logam cair dalam proses pengecoran didekati dengan pers. Bernoulli mengacu pada tekanan masuk (*pouring basin*) dan tekanan keluar (*riser*) diasumsikan konstan (tekanan atmosfer). Akan tetapi PSV dengan perbedaan tekanan *pouring basin* dan *riser* $0,131 \text{ kg/cm}^2$ (0,132 atm) memberikan pengaruh signifikan pada kecepatan logam cair, dan pevakuman dapat mencegah hidrogen (udara) larut ke logam cair. Lee dan Hunt [4] menyatakan kelarutan hidrogen proposional dengan tekanan parsialnya (p_{H_2})

seperti yang diatur oleh hukum Sievert's dan dalam kurun waktu 10 menit sudah dicapai kondisi kesetimbangan.

Menurut Polmear [5] duralumin nama lain dari paduan aluminium-tembaga (3.5-5.5% Cu) ditemukan sekitar tahun 1901-1906 oleh Dr. Alfred Wilm, biasanya pada duralumin ditambahkan kurang dari 1% Mg and Mn. Material duralumin mempunyai beberapa kelebihan diantaranya; perbandingan kekuatan terhadap berat jenis tinggi (dalam kondisi O : 288 MPa dan T4 : 713 MPa), ketahanan korosi dan konduktifitas elektriknya baik, sifat ketangguhan patah dan ketahanan lelehnya sangat tinggi, dan dapat diberi perlakuan panas. Dalam standard *Aluminum Association* (AA), material duralumin dirancang untuk kebutuhan tuang (*cast*) atau tempa (*wrought*), duralumin *cast* dan *wrought* masing-masing disimbulkan dengan 2xx.x dan 2xxx. Menurut Alcoa, Sofyan [6, 7] duralumin merupakan salah satu paduan aluminium (Al-Cu-Mg) yang sering digunakan untuk komponen pesawat terbang. Davis [8] menyatakan setelah Perang Dunia II material duralumin dilupakan para rekayasawan, karena mampu tuangnya rendah dan material ini digantikan oleh paduan Al-Si (silumin). Tetapi beberapa sifat duralumin lebih tinggi dari paduan aluminium lain, seperti; perbandingan kekuatan terhadap berat jenis tinggi, mampu diberi perlakuan panas, mampu dilas, dan tahan impak pada temperatur cryogenic. Eksperimen perlakuan panas *cryogenic* (-196 °C) pada paduan *non ferrous* seperti aluminium 7075-T651 menyebabkan terjadinya penguatan presipitasi sehingga menghasilkan kekuatan tinggi dan ketahanan korosi yang baik seperti yang dinyatakan Lulay [9]. Sampath [10] menyatakan paduan Al-Cu-Li dalam kondisi *age-hardened* menjadi kandidat aluminium amorf (fasa tunggal) untuk sepeda tempur dimasa akan datang karena material ini mempunyai kekuatan statik dan mampu meredam ledakan. Duralumin sebagai produk cor mempunyai beberapa kelebihan, diantaranya mempunyai bentuk akhir mendekati bentuk aslinya (*final near net ship*) sehingga proses pengerjaan akhir dapat diminimalis. Akan tetapi mampu tuang material duralumin rendah sehingga tingkat produktivitas pengecoran dengan bentuk-bentuk kompleks menjadi berkurang. Hasil penelitian Sabatinol dan Arnberg [11] menyimpulkan bahwa tembaga dan magnesium, merupakan unsur utama paduan seri 2000 dan 5000, masing-masing biasanya

ditambahkan ke paduan pengecoran aluminium dalam konsentrasi 4 hingga 8% wt. Hasil penambahan paduan Cu dan Mg mempunyai rentang beku besar dapat menyebabkan paduan rentan terhadap robek panas.

Pada kondisi cair aluminium termasuk logam yang mudah menyerap gas hidrogen dari sekelilingnya (udara lembab, *grease* dan *oil*, kandungan air dalam tungku, dan lain-lain). Proses solidifikasi yang cepat pada pengecoran menyebabkan gas hidrogen terjebak dalam aluminium dan mengakibatkan terjadinya porositas. Pequet [12] menyatakan, cacat pengecoran porositas gas merupakan fungsi variasi paduan dan parameter proses. Temperatur *melting* dan *pouring* yang tinggi tidak saja menambah hidrogen larut tetapi dapat pula meningkatkan gradien volume spesifik logam cair dan logam padat sehingga berpotensi menimbulkan kerutan. Kerutan semacam itu dalam pengecoran logam disebut porositas *shrinkage*. Para peneliti dan *foundryman* mengklasifikasikan porositas dalam dua kategori yaitu makropori dan mikropori masing-masing berdiameter lebih dari 0,2 mm dan beberapa mikrometer. Dan Suzuki [13] menyatakan bahwa porositas dan morfologi pori dipengaruhi oleh kompleksitas proses solidifikasi dan unsur paduan. Park [14] melaporkan penambahan silikon dalam paduan Al-Si *hypo-eutectic* akan menambah jumlah porositas yang terbentuk karena fraksi luas daerah eutektik dimana pori terbentuk meningkat.

Menurut Sequeira dkk [15] duralumin dengan 4,2 – 5,0% Cu mempunyai rentang pengisian panjang sehingga dapat menyebabkan cacat penyusutan dan berakibat terjadi *hot cracking*, untuk mencegah terjadinya porositas tersebut gradien panasnya diturunkan. Chen dan Ravindran [16] menyatakan makropori dihasilkan dari penyusutan solidifikasi yang tidak terkompensasi oleh pengisian logam cair, biasanya makropori terjadi pada paduan-paduan dengan rentang pembekuan pendek. Umumnya kualitas hasil pengecoran logam ditentukan oleh munculnya porositas gas dan struktur metalografi produk pengecorannya. Porositas gas terjadi secara diskontinuitas dan berada pada lapisan dalam (*sub-surface*) dan struktur metalografi coran duralumin hanya dapat diketahui melalui pengujian *optical microscopy* (OM), *scanning electron microscopy* (SEM), *X-ray radiography*, atau *picnometry*. Menurut Kim dan Hao, Pastor dkk. [17, 18], radiografi dapat

mengobservasi pori dengan diameter lebih besar 0,2 mm biasa disebut makropori dan pori dengan diameter beberapa mikrometer biasa disebut mikropori. Dan mikropori hanya dapat diobservasi dengan OM atau SEM. Kombinasi *X-ray radiography* dan mikroskop tersebut digunakan untuk mengobservasi porositas gas dalam paduan duralumin. Distribusi dan morfologi pori merupakan isu penting untuk menggambarkan frekuensi dan posisi cacat dalam coran paduan aluminium. Pada bagian kecil ini terdapat 3 macam morfologi pori dalam paduan cor yaitu; struktur yang mendekati *globular*, *columnar*, dan *angular*. Umumnya, apabila pori terbentuk dimulai dari fraksi solid yang kecil, pori yang terbentuk akan besar dan mendekati *globular*, apabila fraksi solidnya besar akan membentuk pori *angular* yang diadopsi dari bentuk ruang interdendritik. Mekanisme pembentukan pori secara rinci diobservasi dengan teknik visualisasi *X-ray radiosopic* seperti dinyatakan Yin dan koster [19].

Porositas dalam pengecoran logam dapat berbentuk; rongga penyusutan masif, makroporositas, pori-pori yang tersebar, atau mikroporositas. Makroporositas dihasilkan dari penyusutan solidifikasi yang tidak terkompensasi oleh pengisian logam cair. Umumnya makroporositas dan mikroporositas masing-masing terjadi pada paduan-paduan *short freezing range* (waktu *feeding* lama) dan *long freezing range* (waktu *feeding* singkat) selama solidifikasi dendritik. Pada *long freezing range* rusaknya pengisian interdendritik disebabkan oleh presipitasi hidrogen atau gas-gas lain yang terlarut. Fungsi kriteria Niyama dapat digunakan untuk memprediksi pembentukan porositas selama proses solidifikasi. Kriteria Niyama tersebut membandingkan *gradient* temperatur sebagai parameter termal dan laju pendinginan yang sangat penting pada solidifikasi untuk memprediksi *shrinkage* dengan mekanisme pengisian interdendritik. Besarnya penurunan perbedaan temperatur lokal pada pengisian lama tingkat mikro dan menyebabkan solidifikasi berlanjut pada skala makro, akan mengurangi pembentukan porositas *shrinkage*. Kecilnya kandungan hidrogen di udara atmosfer ($p_{H_2O} 1.5 \times 10^{-3} - 3.0 \times 10^{-2}$ atm) dan rendahnya kelarutan hidrogen dalam pengecoran aluminium dan paduannya (0,06cc/100g) biasanya diabaikan, tetapi p_{H_2O} yang kecil sering menurunkan kualitas coran karena

porositas. Umumnya paduan Al-Si cor mempunyai cacat porositas dan inklusi yang dapat menurunkan sifat-sifat mekanik material seperti yang dinyatakan Ye [20]. Pada kenyataannya pori tidak dapat menerima beban luar secara terus menerus dan yang lebih berbahaya pori dapat menimbulkan konsentrasi tegangan dan memicu munculnya retak mikro yang terus berkembang. Eksperimen yang telah dilakukan dalam penelitian ini adalah mengurangi gas hidrogen disekeliling (*ambient*) material duralumin pada kondisi *melting*, *pouring*, dan *solidifying* dengan mengontrol tekanan udara (*vacuuming*) sekelilingnya

Proses *degassing* pada pengecoran duralumin umumnya dilakukan dengan pemberian garam (C_2Cl_6 , NaCl, NaF, Na_3AlF_6), injeksi gas-gas inert pada logam *melt*, gaya centrifugal dan tekanan isostatik dalam kondisi *melt-solidification*, dan pevakuman pada solidifikasi. Aspek kebaharuan pada penelitian *degassing* ini adalah mengontrol derajat kevakuman proses peleburan (*melt*) duralumin yang dilanjutkan ke derajat kevakuman lebih rendah pada proses solidifikasinya dalam tungku pengecoran sistem vakum. Menurut Kang dkk. [21], desain dan *isostatic high pressure* pada solidifikasi dapat mengurangi mikroporositas (pori) dan porositas hidrogen (porositas), sehingga sifat mekanik dan regangan aluminium meningkat. Proses *squeeze-casting* aluminium yang dilakukan Binney dkk. [22], menurunkan porositas pada daerah kritis (*hot spot*) hingga 80% volume. Tetapi jika *squeeze pin* terlambat, solidifikasi berlanjut akibatnya gerak *pin stroke* menjadi terbatas akibatnya porositas bertambah. Dalam eksperimen dinyatakan, porositas dan kandungan hidrogen bertambah dengan naiknya temperatur *preheat* permukaan cetakan seperti yang dilakukan Y.M. Li dan Li [23]. Pada percobaan yang berbeda, Meric [24] menyimpulkan bahwa pengecoran vakum menghasilkan densitas yang lebih besar dibandingkan dengan pengecoran atmosfer. *In-Situ Observation* proses pertumbuhan dinamik pori 10mm yang dilakukan Yin dan Koster [21], menyatakan bahwa pertumbuhan pori dan *shrinkage* volume selama solidifikasi dikontrol oleh mekanisme difusi hidrogen. Menurut Xiong dan Kuznstsov [25], pembentukan segregasi dan mikroporositas merupakan dua fenomena fisik penting paduan *binary* yang terjadi selama solidifikasi.

Akurasi perhitungan porositas berdasarkan persamaan Saltykov ditentukan oleh densitas teoritis massa zat solid logam dan paduannya. Kurangnya informasi densitas massa teoritis paduan aluminium, disatu sisi mengurangi keakuratan tetapi sisi yang lain memberikan peluang bagi peneliti untuk mendapatkan metode yang *acceptable* dan nilai densitas massa yang akurat. Dari uraian diatas dapat teridentifikasi suatu permasalahan pemilihan jenis pengujian porositas dalam pengecoran duralumin mengacu pada densitas teoritis kesetimbangan %berat unsur (*%wt element balance*) atau *hot isostatic pressed* adalah : memformulasikan bentuk hubungan porositas gas duralumin hasil uji densitas teoritis berdasarkan kesetimbangan %berat unsur dan variasi proses *hot isostatic pressed*. Selain pengujian kuantitatif porositas gas dalam *casting product* dapat diuji dengan metode kualitatif yaitu mengevaluasi gambar (*image*) yang diperoleh dari hasil foto mikroskop dalam skala makro maupun mikro. Pengamatan terhadap *image* porositas gas dalam *casting product* dapat mendiskripsikan bentuk, dimensi, dan distribusi. Umumnya uji porositas secara kualitatif (*image*) dilakukan untuk validasi uji kuantitatif. Dengan kata lain, kombinasi pengujian porositas gas *casting product* secara kuantitatif dan kualitatif dapat memberikan hasil yang komprehensif (lengkap). Percobaan ini bertujuan untuk mengontrol dan mengevaluasi porositas gas yang terjadi dalam pengecoran duralumin, mengembangkan informasi karakteristik material duralumin cor, dan memperoleh hasil pengukuran ilmiah (*scientific measurement*) yang akurat dari sifat-sifat fundamental atau konstanta fisik.

1.2. Rumusan Masalah

Dari latar belakang, teridentifikasi bahwa hidrogen larut dan terperangkap merupakan penyebab utama cacat porositas gas. Selama proses atau pasca pengecoran cacat porositas gas dalam paduan aluminium (duralumin) dapat dikontrol. Proses pengecoran paduan aluminium dalam kondisi vakum dapat menghasilkan keseimbangan hidrodinamik logam *melt* yang berpengaruh pada perilaku pengisian rongga cetakan (kecepatan, jenis aliran), dan laju pendinginan. Disamping itu, kondisi vakum juga menyebabkan karakteristik psikometrik (perilaku udara; kelembaban nisbi

dan absolut, tekanan parsial, dll) udara didalam tungku PSV berubah. Dengan kondisi tersebut di atas maka rumusan masalah dalam penelitian disusun sebagai berikut :

1. Apa pengaruhnya penambahan tembaga, ketebalan produk, dan proses HIPing terhadap berat jenis dan porositas gas dalam duralumin cor pada tungku reverberatory ?
2. Apa pengaruhnya perbedaan tekanan *feeding* $0,131 \text{ kg/cm}^2$ (negatif) terhadap karakteristik hidrodinamik duralumin *melt*, berat jenis dan porositas dalam duralumin cor ?
3. Apakah bentuk dan distribusi porositas dalam duralumin cor ditentukan oleh penambahan tembaga dan tekanan vakum ?
4. Apakah pengecoran duralumin dalam PSV terbentuk fasa baru dan inklusi ?
5. Apakah ada hubungan metode analisis deduksi dengan pendekatan eksperimental dalam pembentukan porositas gas duralumin cor ?

1.3. Road Map Penelitian

Porositas gas dan penyusutan dalam duralumin dapat dikurangi selama proses pengecoran atau pasca pengecoran. Dinyatakan bahwa desain dan *isostatic high pressure* pada solidifikasi dapat mengurangi mikroporositas (pori) dan porositas hidrogen (porositas), sehingga sifat mekanik dan regangan aluminium meningkat seperti yang dinyatakan Kang dkk. [21]. Dalam eksperimen Y.M. Li dan Li [23], menyatakan bahwa; porositas dan kandungan hidrogen bertambah dengan naiknya temperatur *preheat* permukaan cetakan, temperatur permukaan tuang rendah biasanya menghasilkan sifat mekanik yang tinggi. Pada percobaan yang berbeda Meric [24], melakukan *setting* gas argon dengan debit 3 liter/menit dihubungkan dengan *exhaust* udara *crucible* yang bertekanan 0 sampai 20 Torr. Hasil penelitiannya menyimpulkan bahwa pengecoran vakum menghasilkan densitas yang lebih besar dibandingkan dengan pengecoran atmosfer. Binney dkk. [22] melakukann proses *squeeze pin* pada pengecoran aluminium dapat menurunkan porositas pada daerah kritis (*hot spot*) hingga 80% volume.

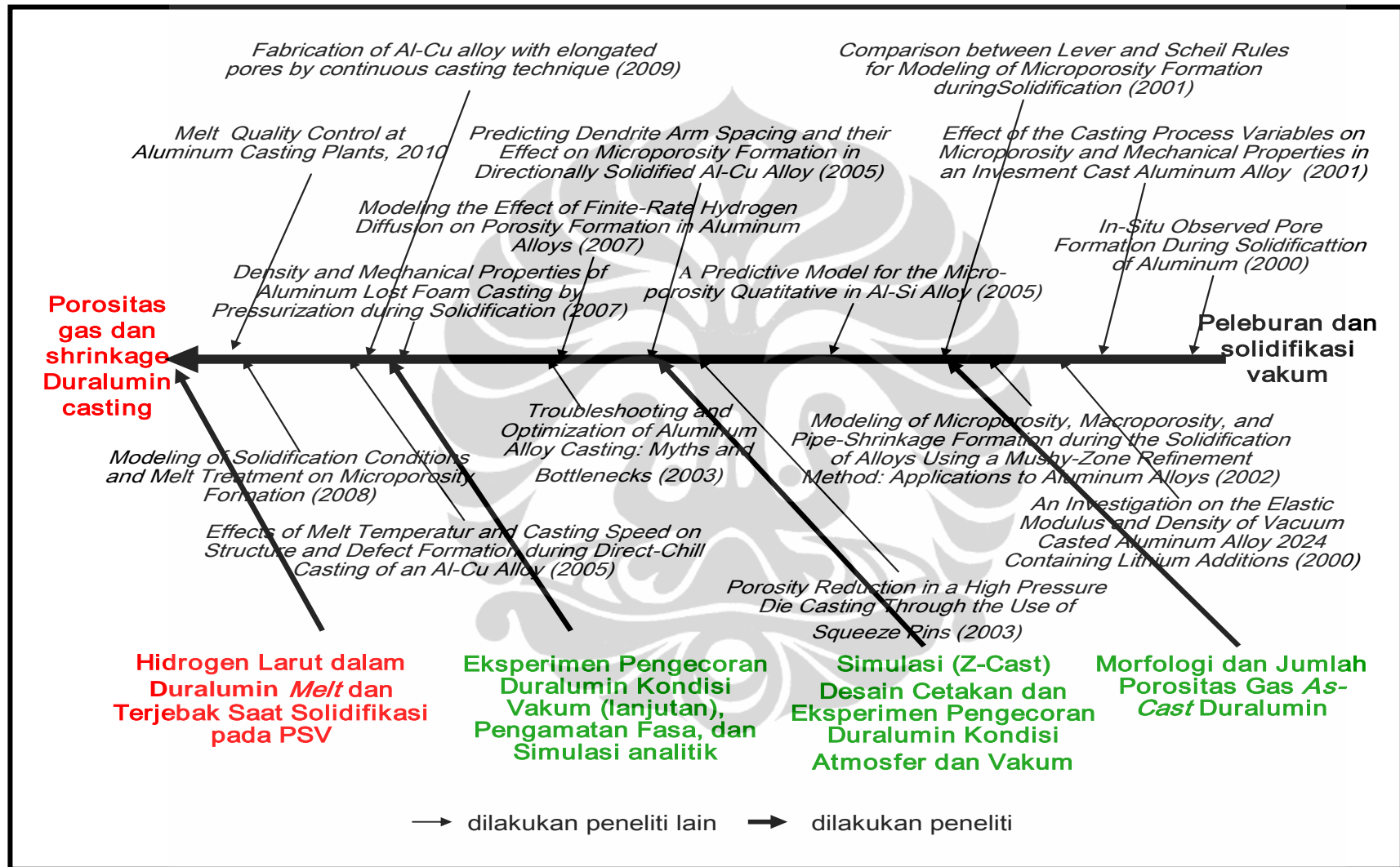
Tetapi jika *squeeze pin* terlambat, solidifikasi berlanjut akibatnya gerak *pin stroke* menjadi terbatas sehingga porositasnya bertambah. Wien [26] menyatakan hampir 80% aluminium digunakan sebagai komponen otomotif yang diproduksi dengan proses pengecoran. Disamping itu peneliti tersebut juga melakukan percobaan teknologi pengecoran untuk meningkatkan keuletan paduan Al-Si-Mg tanpa perlakuan T6 (*spheroidization*). Hasil percobaan tersebut menyimpulkan bahwa temperatur perlakuan panas yang tinggi menghilangkan gelembung gas sehingga keuletannya menjadi tinggi ($\epsilon > 15\%$) pada tingkat tegangan ($YS > 180 \text{ MPa}$). Hongbin [19] melakukan *In-Situ Observation* pada proses pertumbuhan dinamik pori 10 mm, hasil analisisnya menyatakan bahwa pertumbuhan pori dan *shrinkage* volume selama solidifikasi dikontrol oleh mekanisme difusi hidrogen. Menurut Xiong dan Kuzntsov [26], pembentukan segregasi dan mikroporositas merupakan dua fenomena fisik penting paduan *binary* yang terjadi selama solidifikasi. Studi ini menginvestigasi pengaruh difusi larutan pada skala lokal (yaitu skala mikroskopik yang menunjukkan volume rata-rata elemen pada transport larutan dan pembentukan mikroporositas selama proses ini). Aturan Scheil dan pengungkit digunakan untuk menguraikan difusi larutan pada skala lokal. Hasilnya menunjukkan difusi larutan pada skala lokal merupakan faktor penting dalam pembentukan mikroporositas. Juga, pembentukan mikroporositas secara langsung berkurang terhadap kebalikan segregasi yang secara parsial mengkompensasi *shrinkage*. Penambahan tekanan eksternal pada permukaan bebas atau pengurangan konsentrasi awal hidrogen paduan cair secara efektif dapat mengontrol pembentukan mikroporositas.

Disamping riset eksperimental, para peneliti juga melakukan pemodelan porositas gas dan *shrinkage*. Eskin [27] melakukan pengujian struktur mikroporositas (tanpa menghitung jumlah gabungan pori dalam *microcrack* dan retak diabaikan), menunjukkan bahwa temperatur *melt* tidak memberikan perubahan signifikan pada distribusi atau jumlah pori. Fraksi volume pori cenderung bertambah ke arah pusat *billet* dan kecepatan tuang. Disimpulkan, distribusi porositas merupakan fungsi kecepatan pengecoran, temperatur *melt*, dan posisi *billet*. Darisini terlihat fraksi porositas pada

temperatur 760 °C dan kecepatan pengecoran 200 mm/min, tidak memberikan pengaruh signifikan, seperti perbandingan fraksi volume porositas sangat kecil dalam skala kesalahan pengukuran (0,05). Carlson dkk. [28] menggunakan kriteria Niyama ($G/\sqrt{T^*}$) untuk menyatakan bahwa *shrinkage porosity* meningkat dengan bertambahnya nilai Niyama. Mekanisme solidifikasi paduan biner, dendrit tumbuh dan masuk ke media cair sehingga terbentuk daerah “*mushy*” seperti yang dinyatakan Battaglia dan Rozot [29]. Selanjutnya dendrit membentuk jejaring dan terjadi media pori. Berdasarkan bentuk *micro-porosity* dibedakan atas dua macam yaitu; 1). porositas gas yang disebabkan oleh kelarutan hidrogen dalam cairan tinggi. Selama solidifikasi hidrogen masuk ke dalam bagian cair dan membentuk gelembung-gelembung, akibatnya disekeliling aluminium padat dikelilingi gelembung (porositas). Dalam pengecoran paduan aluminium gas nitrogen dapat digunakan untuk mengeluarkan gas. 2). Kontraksi volumetrik (*interdendritic*) saat solidifikasi disebut *shrinkage*. Menurut Melo dkk. [30], mikroporositas terjadi di atas rentang temperatur struktur dendrit, dan berpengaruh langsung pada sifat mekanik. Mikroporositas yang terjadi selama solidifikasi pengecoran disebabkan pelepasan gas dari logam cair atau ketidakmampuan logam cair mengisi saluran *interdendritic* akhirnya terkompensasi oleh kerutan (*shrinkage*). Laju pendinginan di atas 1 °C/s jumlah pori bertambah karena kecilnya *primary dendrite arm spacing* (PDAS) dan *secondary dendrite arm spacing* (SDAS), permeabilitas dan tekanan turun. Laju pendinginan (dibawah 1 °C/s) mikropori tidak terbentuk (spasi *interdendritic* besar). Disamping itu Sabatinol [11], melakukan pemodelan, yaitu; model mikropori dari larutan pada persamaan Darcy’s dan mikrosegresi gas, yang dikembangkan untuk semua geometri *two-dimensional* (2-D) dan *three-dimensional* (3-D) *geometry* dan dihubungkan untuk waktu pertama dengan prediksi-prediksi makropori dan *pipe-shrinkage*.

Penelitian porositas gas dalam sistem pengecoran vakum yang dilakukan terdiri tiga sub-penelitian, yaitu; 1). Morfologi dan Jumlah Porositas Gas Pengecoran Duralumin pada Tungku Reveberatory dengan uji Picnometry, OM, SEM, dan *X-ray Radiography*, 2). Simulasi Z-Cast untuk

validasi model cetakan dan Karakterisasi Porositas Duralumin Hasil Pengecoran tungku PSV pada Kondisi Tekanan Atmosfer dan Vakum, 3). Melanjutkan Karakterisasi Porositas *Remelt* Duralumin Hasil Pengecoran Sistem Vakum dan Model Analitik. Dari sub-penelitian 1, diperoleh informasi dan kontrol porositas gas, korelasi persentase berat tembaga dengan berat jenis dan porositas duralumin. Pada sub-penelitian 2, peneliti memprediksi fenomena porositas dengan *soft were Z-Cast*, mengembangkan informasi karakteristik material duralumin cor, dan memperoleh hasil pengukuran ilmiah (*scientific measurement*) yang akurat dari sifat-sifat fundamental atau konstanta fisik. Dan pada sub-penelitian 3, berdasarkan kesetimbangan tekanan parsial hidrogen (p_{H_2}) dan logam *melt*, berdasarkan parameter hidrodinamika duralumin melt, dilakukan kontrol dan evaluasi porositas gas yang terjadi dalam pengecoran duralumin. Sub-penelitian 1, 2, dan 3 diperlukan untuk mendukung penelitian; Porositas Gas pada Material Duralumin dalam Sistem Pengecoran vakum. Untuk lebih jelasnya *road map* penelitian dapat dilihat pada diagram *fishbone* dalam Gambar 1.1.



Gambar 1.1. Diagram fishbone dari road map penelitian

1.4. Aspek Kebaruan Penelitian

Berdasarkan pendalaman literatur dan *road map* yang disusun, dapat dilihat adanya korelasi positif pada proses pengecoran duralumin antara tingkat kevakuman sekeliling logam *melt* dengan gas hidrogen larut dan terperangkap saat solidifikasi berakibat pada pembentukan porositas gas. Naiknya suhu menyebabkan tekanan udara meningkat sehingga gas hidrogen (H_2) dan oksigen (O_2) disekeliling logam *melt* naik akibatnya porositas bertambah. Secara konvensional gas hidrogen larut dan terperangkap dalam duralumin *melt* direduksi dengan proses *degassing* seperti; pemberian garam (C_2Cl_6 , NaCl, NaF, Na_3AlF_6), injeksi gas-gas *inert* pada logam *melt*, gaya centrifugal dan tekanan isostatik kondisi *liquid-solid*, dan *vacuuming* saat *melting* atau *solidifying* tetapi hasilnya belum optimal. Pengembangan proses *degassing* dengan PSV yaitu pengecoran duralumin dengan kontrol derajat kevakuman proses *melting* yang dilanjutkan ke proses *solidification* pada derajat kevakuman $0,131 \text{ kg/cm}^2$ lebih rendah dari tekanan *melt* merupakan aspek kebaruan pada penelitian ini. Proses *vacuuming* dalam PSV menyebabkan gas hidrogen dan oksigen disekeliling logam *melt* berkurang akibatnya porositas dan inklusi dalam duralumin turun. Pengaruh positif dari Teknologi *vacuuming* dalam PSV dapat meningkatkan *yield casting* duralumin. Kontribusi penelitian ini dapat memberikan suatu nilai tambah baru dalam pengembangan teknologi *degassing* dengan menggunakan teknologi tekanan vakum rendah yang terintegrasi pada pengecoran paduan aluminium.

1.5. Batasan Masalah

Dalam rangka memfokuskan penelitian ini, maka pembahasan diarahkan pada pendekatan; analitik, pemodelan komputer (Z-Cast), dan eksperimental untuk menjelaskan mekanisme pembentukan porositas gas dan *shrinkage* dalam pengecoran duralumin yang meliputi :

1. Mekanisme dan kinematika pembentukan cacat porositas (gas hydrogen dan *shrinkage*) dalam pengecoran duralumin, didasarkan pada penggunaan hukum-hukum fluida (*Bernoulli's Theorem*, *Law of Continuity*, dan *Reynolds Number*), sifat termodinamika material solid-

liquid, dan perpindahan panas untuk menganalisis terjadinya kedua cacat porositas tersebut.

2. Karakterisasi *casting product* duralumin yang terdiri dari; densitas massa, porositas (kuantitas dan kualitas), sistem diagram kesetimbangan paduan Al-Cu dan transformasi fasanya.
3. Pengujian kuantitas menggunakan *picnometry apparatus* dan pengujian kualitas (*image*) menggunakan *optical microcopy* (OM), *scanning electron microcopy* (SEM) dan *X-ray diffraction* (XRD) digunakan untuk menganalisis metalografi coran duralumin.

1.6. Hipotesis

Untuk memandu dalam menjawab empat pertanyaan permasalahan tersebut di atas, diajukan tiga hipotesis sebagai berikut :

1. Hisapan udara oleh bagian tarikan tekanan negatif *nozzle* mengakibatkan tekanan dalam ruang menjadi vakum. Selanjutnya penurunan derajat kevakuman akan meningkatkan laju evolusi gas hidrogen dan menurunkan tekanan parsial gas hidrogen (H_2) dan oksigen (O_2) sekeliling ruang pengecoran (*melting, pouring, dan solidifying*) akibatnya gas hidrogen larut dan terperangkap dalam duralumin *melt* dan *solid* semakin berkurang. Dan pembentukan oksida dalam duralumin dapat diminimalis. Akhirnya, penurunan gas hidrogen dan oksigen dalam proses pengecoran sistem vakum dapat menurunkan jumlah porositas gas dalam duralumin cor.
2. Beban luar (tekanan dan temperatur tinggi) yang diberikan dalam waktu lama (proses HIPing) pada material duralumin dapat menurunkan porositas *sub-surface* material tersebut. Hilangnya porositas dalam material duralumin akan meningkatkan densitas massanya (densitas massa teoritis), akibatnya perhitungan uji kuantitatif porositas (*picnometry*) basis proses HIPing akan menghasilkan nilai yang lebih akurat (mendekati aktualnya) dibanding basis MB.
3. Selain aluminium, tembaga (*melt*) merupakan unsur yang reaktif terhadap penyerapan gas hidrogen. Penambahan tembaga dalam sistem pengecoran paduan aluminium meningkatkan densitas massa *casting product* tetapi

porositas dalam PSV yang dirumuskan dalam persamaan Saltykov akan meningkat seiring dengan penambahan tembaga. Penomena ini harus dipahami sebagai keunikan peristiwa metalurgi dalam proses pemaduan aluminium dan tembaga. Turunnya porositas dalam PSV dengan penambahan tembaga merupakan penomena *deminishing of return*.

1.7. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk :

1. Mengembangkan dan membuat tungku pengecoran sistem vakum yang dapat beroperasi selama peleburan, penuangan, dan pembekuan dengan temperatur dan tekanan maksimum 800 °C dan 0,131kg/cm².
2. Mengurangi terbentuknya cacat porositas gas pada *casting product* duralumin dengan cara membuat ketidak setimbangan sistem sehingga hidrogen dalam logam cair keluar dari duralumin cair secara difusi.
3. Melakukan karakterisasi porositas gas secara kuantitatif dan kualitatif, metalografi dan fasa dalam pengecoran sistem vakum duralumin.
4. Mengobservasi mekanisme pembentukan dan memprediksi cacat penyusutan (*shrinkage*) yang terjadi dalam pengecoran paduan aluminium.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Unsur Paduan Aluminium

Pengecoran logam sudah dikenal sebelum prasejarah sekitar 10.000 tahun yang lalu, pengecoran dibuat dari logam *native* seperti; tembaga, emas, timah putih dan hitam, dan perak. Sofyan [6] menyatakan, pengecoran aluminium dan paduannya merupakan pengecoran logam relatif "baru" karena dalam sejarah tidak pernah ditemukan zaman aluminium. Penambahan unsur paduan yang proposional kedalam aluminium dapat memperbaiki sifatnya tetapi apabila penambahannya tidak terkontrol dapat merusak sifat-sifatnya. Disamping itu kualitas pengecoran logam khususnya paduan aluminium sangat dipengaruhi unsur makro dan mikro udara sekeliling yang terdiri dari unsur-unsur; nitrogen (N₂) 78,08% Vol, oksigen (O₂) 20,95% Vol, hidrogen (H₂) 0,00005% Vol, uap air (H₂O), dan lain-lain. Pada suhu tinggi aluminium sangat reaktif terhadap gas hidrogen. Kelarutan hidrogen dalam aluminium ditentukan oleh hubungan kesetimbangan antara konsentrasi hidrogen dalam aluminium dan tekanan parsial hidrogen pada atmosfer. Unsur-unsur paduan mempunyai pengaruh yang berbeda bila berada dalam logam lain, pada aluminium unsur seperti: besi, chromium, magnesium, manganese, silikon, tembaga, dan *zinc* masing-masing memberikan pengaruh sebagai berikut;

- Besi (Fe) digunakan untuk memperbaiki ketahanan *hot tearing*, dan mengurangi kecenderungan *die sticking* atau *soldering* dalam cetakan logam, memperbaiki keuletan dan mampu dimesin. Akan tetapi jumlahnya harus dibatasi karena kecenderungan membentuk campuran atau fasa tak larut yang berpengaruh jelek pada *casting*, contoh fasa intermetalik (komplek) Al₁₅(FeMn)₃Si₂, Al₅FeSi yang bentuknya menyerupai jarum.
- Chromium (Cr) digunakan dalam paduan aluminium untuk menekan pertumbuhan butir, fenomena ini terjadi karena fasa Cr₇Al mempunyai kelarutan yang rendah dan Cr memperbaiki ketahanan korosi dalam paduan aluminium.

- Magnesium (Mg) berkontribusi meningkatkan kekerasan dan kekuatan dalam paduan Al-Si karena fasa larut Mg_2Si yang tergantung temperatur.
- Manganese (Mn) dalam paduan aluminium dianggap sebagai pengotor dan keberadaannya dikontrol sekecil mungkin. Apabila berkombinasi dengan *ferro* membentuk fasa *insoluble*.
- Silikon (Si) digunakan untuk meningkatkan karakteristik pengecoran dengan memperbaiki fluiditas, ketahanan *hot tearing* dan *feeding*. Jumlah maksimum Si dalam proses pengecoran tergantung pada kebutuhannya, untuk solidifikasi lambat (*sand* dan *investment*) sekitar 5-7%Si, untuk cetakan permanen sekitar 7-9%Si, dan untuk *die casting* sekitar 8-12%. Penambahan silikon ke dalam aluminium menghasilkan kumpulan *eutectic* yaitu pertumbuhan secara bersamaan dua fasa atau lebih dari kondisi *melt* yang kemungkinan menghasilkan morfologi berbeda. Berbentuk *lamellar* apabila frasi volume tiap fasa hampir sama atau *interface* pada bagian minornya berupa plat, dan akan berbentuk serat (*fibrous*) apabila fase yang ada fraksi volumenya kecil.
- Tembaga (Cu) digunakan untuk memperbaiki kekuatan dan kekerasan dalam paduan *heat treatable*, tetapi unsur ini akan menurunkan ketahanan korosi, *hot tearing*, dan *castability*. Dash dan Makhhlouf [31] menyatakan, Cu mempunyai pengaruh negative terhadap porositas artinya kandungan Cu yang rendah akan mengurangi porositas. Cu dalam pengecoran paduan aluminium membentuk Al_2Cu yang tampak seperti partikel-partikel kecil *pink* diakhir solidifikasi dan Cu meningkatkan penyebaran mikroporositas. Tembaga secara signifikan meningkatkan tekanan gas hidrogen yang menyebabkan gas terlarut.
- Zinc (Zn) ditambahkan kedalam paduan aluminium karena memberikan pengaruh yang baik pada *age hardening*.

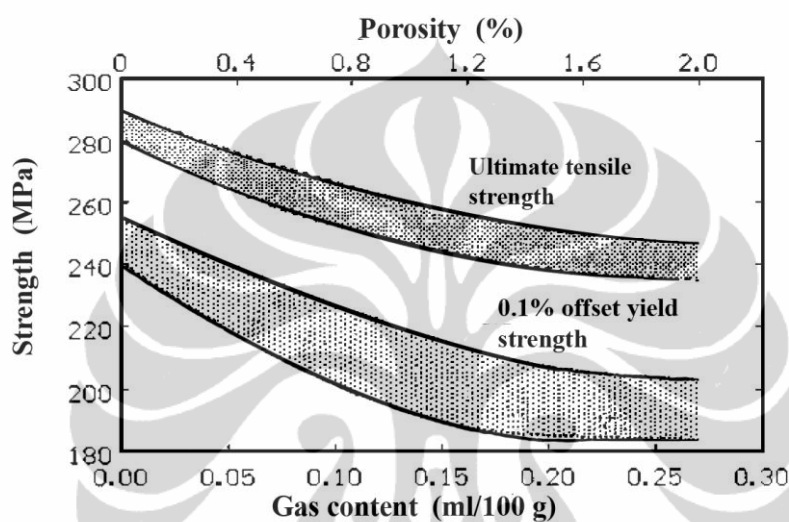
Paduan aluminium menurut *Aluminum Association* dirancang dalam 9 seri, yaitu ;

- 1xx.x : komposisi aluminium murni, contoh; 1050, 1060, 1070, 1080, 1090, dll.

- 2xx.x : tembaga sebagai paduan utama dalam paduan aluminium, dan paduan seri 2xx.x ini termasuk *heat treatable*, contoh; 2017, A2024-T3, 2036, 2037, 2091, 2095, 2219, 2195, dll.
- 3xx.x : paduan aluminium–silikon yang mengandung magnesium atau tembaga. Silikon dalam paduan ini untuk meningkatkan fluiditasnya, dan paduan seri 3xx.x ini termasuk *heat treatable*, contoh; 3003, 3004, 3005, 3105, 3104, dll.
- 4xx.x : paduan biner aluminium-silikon, silikon digunakan sebagai paduan untuk meningkatkan kapasitas pengisian khususnya pada cetakan yang kompleks, contoh; 4032, 4033, 4043, 4119, 4120, 4145, 4192, 4195, 4343, 4543, dll.
- 5xx.x : magnesium sebagai paduan utama dalam paduan aluminium, contoh; 5010, 5013, 5017, 5040, 5042, 5043, 5052-O, 5083, 5454-O, 5456-O, dll.
- 6xx.x : paduan ini jarang digunakan, contoh; 6009, 6013, 6022, 6061, 6111, dll.
- 7xx.x : paduan aluminium yang mengandung *zinc* sebagai unsur utama, dalam paduan ini ditambahkan tembaga, magnesium, chromium atau manganese. Paduan seri 7xx.x ini termasuk *heat treatable*, contoh; 7050, 7055-T77, 7075, 7475, dll.
- 8xx.x : paduan aluminium yang mengandung timah putih sebagai paduan utamanya, contoh; 8001, 8004, 8010, 8090, 8091, 8017, 8130, 8176, dll.
- 9xx.x : paduan ini tidak digunakan.

Pada pengecoran paduan aluminium, beberapa peneliti menyatakan bahwa cacat yang terbentuk selama solidifikasi, seperti; segregasi, inklusi, dan porositas memberikan pengaruh yang drastis pada sifat mekanik. Contoh, gas hidrogen dalam logam *cair* apabila seluruhnya tidak dapat diusir saat solidifikasi akan terjadi porositas pada *casting product*. Porositas dalam paduan aluminium dapat sangat kecil, tersebar, atau jika konsentrasi gasnya relatif rendah porositasnya terlokalisasi pada suatu tempat coran yang solidifikasinya paling akhir. Mikropori hidrogen tidak akan merugikan kecuali jika mengakibatkan tekanan yang kuat. Disisi lain, beberapa cacat porositas menjadi besar dan tampak sebagai retak atau

lubang-lubang (*blow holes*). Secara fisik porositas gas dan *shrinkage* dapat dibedakan, porositas gas disebabkan oleh ada dan terperangkapnya gas dan tampak sebagai lubang-lubang bulat dari pengujian metalografi. Dan porositas *shrinkage* karena pengisian yang tidak mencukupi selama solidifikasi dan bentuknya lebih tidak beraturan dan lebih panjang dibanding porositas gas. Menurut Colas [32], cacat porositas menurunkan sifat-sifat mekanik paduan aluminium seperti dalam Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Hubungan kandungan gas, porositas Vs kekuatan [32]

Pada kondisi tertentu proses manufaktur, seperti pengecoran paduan aluminium memberikan keuntungan yang sangat penting yaitu mampu menghasilkan kekuatan tinggi dengan berat yang ringan, bentuk fungsional dengan kompleksitas tinggi secara cepat dan mudah dibuat. Secara metalografi, mikrostruktur dapat digunakan untuk menjelaskan kronologis pembekuan dan memprediksi kekuatan paduan aluminium *casting*. Dalam pengecoran proses solidifikasi terlihat pada dinding cetakan bagian yang tipis hal ini disebabkan laju nuklasi tinggi sehingga terbentuk lapisan butir kecil *equiaxial*. Lapisan ini berakhir ketika nuklasi berhenti oleh bertambahnya temperatur yang dihasilkan oleh pelepasan panas laten pada solidifikasi. Beberapa butiran original *equiaxed* dapat tumbuh sehingga membentuk lapisan butir-butir besar *columnar* yang berkontribusi menurunkan sifat mekanik. Daerah *columnar* ini terhenti apabila terjadi perubahan gradien temperatur dan nuklasi butir-butir baru. Penambahan partikel intermetalik $Al_{15}(FeMn)_3Si_2$ dapat mengakibatkan nuklasi dengan

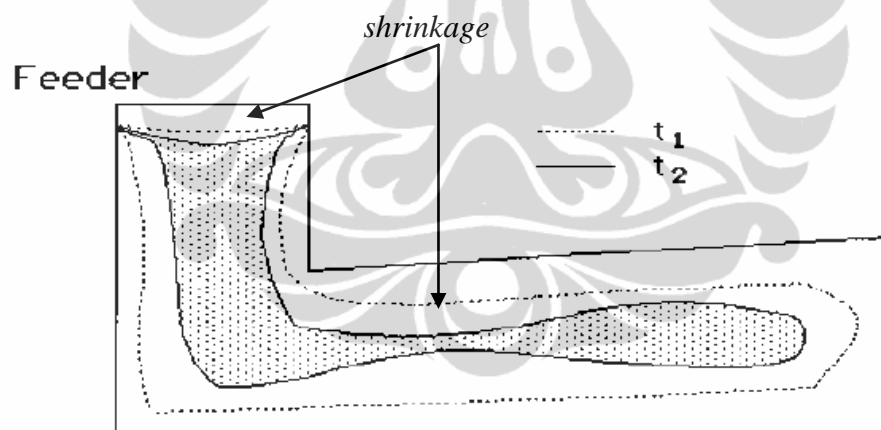
pendinginan rendah (dibawah 1 °C) yang terbentuk didepan butir-butir *columnar* yang menyebabkan terbentuknya butiran baru aluminium. Pada pengecoran paduan aluminium dengan struktur ukuran butir kecil *equiaxed* banyak diminati karena memberikan beberapa keuntungan seperti, dapat memperbaiki sifat mekanik dan karakteristik permukaan, meningkatkan ketahanan *hot tearing* dan homogenitas, dan mengurangi segregasi. Dengan kata lain dendrit yang terbentuk selama solidifikasi dipengaruhi oleh laju pendinginan, distribusi dan aspek agregat eutektik, seperti ukuran butir dapat dikontrol dengan penambahan unsur paduan dan laju pendinginan. Ukuran dan distribusi fasa intermetalik jauh lebih kompleks dibandingkan fasa metalik.

Dalam pengecoran paduan aluminium terdapat dua jenis cetakan yaitu cetakan yang sekali pakai (*expendable*) dan cetakan yang dapat digunakan berulang kali (*permanent*). Sistem pengisian (*feeding*) membantu mencegah cacat pengecoran seperti; porositas, *shrinkage* akibat penempatan *feeder* pada satu lokasi atau sekeliling cetakan. Porositas dalam pengecoran aluminium disebabkan oleh gelembung gas yang terperangkap dalam solidifikasi paduan (porositas gas) dan kekosongan yang terbentuk diantara dua dendrit karena efek penyusutan solidifikasi (porositas *shrinkage*). Gelembung gas yang disebabkan hidrogen menghasilkan presipitat yang mana logam cairnya mengalami solidifikasi karena perubahan drastis dalam solidifikasi oleh udara bertekanan selama kecepatan logam cair tinggi pada pengisian rongga cetakan. Porositas *shrinkage* berkembang apabila aliran *interdendritic* logam cair menjadi *block* dan ukuran porositas *shrinkage* tergantung pada laju solidifikasi apabila *dendritnya* besar laju solidifikasinya lambat.

2.2. Mekanisme Cacat Dalam Cetakan

Kunci keberhasilan membuat produk coran yang baik salah satunya ditentukan oleh desain cetakan yang baik dan benar. Terutama bila menggunakan sistem penuangan gravitasi potensi terjadinya cacat ditentukan oleh mekanisme pengisian rongga cetakan karena aliran logam menuju rongga cetakan melalui *gating system* sering mengalami gangguan atau hambatan. Potensi cacat biasanya terjadi akibat kesalahan desain yang mengakibatkan aliran logam cair tidak

optimal. Pada aluminium, laju pembekuan juga dapat menjadi faktor penentu besarnya cacat yang timbul. Untuk mendapatkan desain yang baik, umumnya para perancang mengikuti beberapa aturan dalam pembuatan *gating system*. Mekanisme pembekuan logam dimulai dari bagian yang kontak dengan cetakan dan dilanjutkan ke arah bagian dalam. Gambar 2.2. menunjukkan bagaimana rongga *shrinkage* terbentuk ketika terjadi salah desain dalam pengecoran. Gambar 2.2. juga mengilustrasikan mobilitas *liquid-solid interphase* yang sama dalam segala arah (t_1), tetapi dengan berjalannya waktu (t_2), desain yang salah akan menyebabkan kontak antara gerakan *interphase* sehingga cairan logam terisolasi dari *feeder* yaitu waktu cairan membeku yang berakibat pada pembentukan rongga. *Shrinkage* dalam pengecoran dapat dihindari dengan membuat laju pendinginan yang serempak dan mendistribusikan panasnya lebih merata. Selain itu untuk menghindari *shrinkage* biasanya disarankan dengan memodifikasi riser (jumlah, jenis, dan posisi). Dalam pengecoran laju solidifikasi sering digunakan untuk mengontrol morfologi mikrostruktur.



Gambar 2.2. Pembentukan *shrinkage* akibat *feeder* yang salah [32]

Shrinkage solidifikasi dalam pengecoran logam dibedakan atas tiga yaitu : *directional*, *eutectic*, dan *equiaxed* mengacu pada Dobrzanski [33]. Dalam *shrinkage directionally*, bagian-bagian kecil *shrinkage* diprediksi berdasarkan geometri pengecoran dan perbedaan panas cetakan. Contoh, tipe solidifikasi dimulai pada dinding cetakan dan bergerak tegak lurus ke arah bagian pusat yang biasa disebut solidifikasi progresif. Solidifikasi juga dimulai pada bagian yang dingin dimana perbandingan daerah permukaan cetakan terhadap volume

logamnya besar dan perpindahannya mengarah ke bagian yang panas disebut *directional solidification*. Tipe solidifikasi ini sebagai pedoman untuk mengatur bagian geometri sehingga solidifikasi *directional* terjadi sebelum solidifikasi progresif terpotong sumber *supply* logam cair (*riser*). Tanpa memperhitungkan bagian geometri yang tepat (contoh, *risering* dan *tapering*), kekosongan (*shrinkage cavities*) atau porositas akan terjadi karena terisolasinya *shrinkage* internal.

Solidifikasi tipe eutektik, logam cair dingin dan solidifikasinya terjadi sangat cepat, kejadian ini mengurangi *shrinkage* internal dan diperlukan *riser*. Material-material tipe eutektik mempunyai *shrinkage* solidifikasi sangat kecil pada umumnya tidak membutuhkan *riser*. Perlu ditegaskan bahwa riser adalah reservoir logam cair yang mengalir secara kontinyu mengisi rongga cetakan dengan logam cair sampai solidifikasi secara menyeluruh. Aturan geometri untuk paduan solidifikasi tipe eutektik seperti paduan 356 kecil tetapi *shrinkage* solidifikasinya cukup besar untuk memastikan *supply* logam cair terus terbuka dan semuanya saluran berfungsi sampai solidifikasi berakhir. Sebagai tambahan kedua solidifikasi *progressively* dan *directionally* dari dinding cetakan, paduan-paduan menunjukkan perilaku solidifikasi *equiaxed* yaitu solidifikasi yang dimulai diseluruh bagian cairan, membentuk daerah *mushy* yang terdiri kepulauan *equiaxed* pada padatan. Kepulauan *equiaxed* ini dapat membuka blok *supply* logam cair dan paduan yang sulit diisi. Suatu upaya mengurangi pengaruh ini dengan memperpendek panjang daerah *mushy* sehingga menambah gradien termal (seperti, meningkatkan laju solidifikasi dengan menambah *chill*, dan lain sebagainya). Dalam pendekatan ini, masa panas menyebar keluar dan terdistribusi merata ke seluruh coran. Ini menyebabkan *shrinkage* terdistribusi menjadi porositas mikroskopik diseluruh volume coran. Kedua pendekatan ini, berpengaruh pada sifat-sifat mekanik yang kebanyakan diminimalis dengan ukuran kecil, bentuk bulat, dan menghasilkan dispersi yang merata. Aluminium murni dan paduan dengan rentang *short freezing* mempunyai persentase aluminium yang tinggi menunjukkan solidifikasi *directional* umumnya paduan eutektik seperti aluminium-silikon (11,6% Si) menunjukkan layaknya solidifikasi jenis eutektik. Paduan aluminium dengan rentang *long freezing*, lebih menunjukkan solidifikasi tipe *equiaxed*.

Akhir-akhir ini studi porositas telah lalu melangkah maju dimana observasi dan eksperimen sudah berbasis simulasi bantuan komputer. *Shrinkage porosity* merupakan masalah utama dalam pengecoran paduan aluminium baik coran dengan cetakan pasir maupun cetakan permanent. Menurut Ravi [34], *shrinkage porosity* sulit diprediksi secara manual karena banyaknya faktor yang mempengaruhi, seperti : bentuk coran yang kompleks (menyebabkan perpindahan panas dari permukaan cetakan tidak merata), celah udara pada *interface* cetakan logam, konveksi dalam logam cair, permukaan *feedaids*, adanya inti, dan rancangan saluran yang jelek. Simulasi bantuan komputer ini dilakukan untuk mengungkap mekanisme pembentukan dan memprediksi porositas yang terjadi. Simulasi komputer untuk keperluan tersebut tentu saja menggunakan kriteria yang berbasis parameter termal seperti; temperatur cetakan, temperatur tuang, jenis bahan, dan lain-lain. Simulasi porositas dalam penelitian ini sangat penting karena simulasi ini dapat memprediksi jumlah gas hidrogen terlarut dan terjebak dalam pengecoran paduan aluminium. Berdasarkan uji metalografi (morfologi dan mikro-struktur) kedua jenis porositas tersebut dapat dibedakan satu dengan lainnya. Simulasi porositas pada penelitian ini dilakukan dengan dua metode. Metode pertama, simulasi dilakukan secara analitis yang berbasis pada analisa dimensional, kekekalan energi, aliran kontinuitas, dan sifat-sifat fisik material duralumin. Metode kedua, simulasi dilakukan dengan *software Z-Cast* yang berbasis pada analisa geometri (*autoCad* bentuk 3-D).

2.3. Proses Solidifikasi Dalam Pengecoran Duralumin

Secara umum dapat dijelaskan bahwa didalam pengecoran logam diusahakan untuk mendapatkan ukuran butiran yang kecil karena akan memperbaiki sifat mekanik. Ukuran butir kecil, distribusi homogen dan mempercepat laju nuklasi yang kesemuanya diperoleh dengan menambahkan inokulen-inokulan kedalam logam cair. Bentuk inti padat dalam transformasi pendinginan logam merupakan pertumbuhan inti yang utuh dari pada pengintiannya itu sendiri. Berdasarkan perubahan solid-liquid merupakan proses dua atom antarmuka yaitu : reaksi *melting* ; atom *solid* \rightarrow atom *liquid* dan reaksi

freezing ; atom *liquid* → atom *solid*. Temperatur interface solid-liquid merupakan faktor penting untuk mengontrol bentuk *interface*. Pada aliran panas *unidirectional* untuk temperatur liquid lebih tinggi dibandingkan *solid* sehingga *interfacenya* berupa undercooled dengan ΔT_K sebagai penggerak reaksi *interface*. Pada umumnya semua logam membeku dengan bentuk *nonfaceted interface* yaitu pembekuan dengan harga ΔT_K yang sangat kecil 0,01 – 0,050 °C sehingga peristiwa *solid-liquid* sangat tergantung pada T_f isoterm sistem. *Nonfaceted interface* merupakan bentuk penambahan atom karena peningkatan atom seluruh permukaan yang dilalui, *nonfaceted interface* biasa dikenal dengan difusi *interface*. Adanya gradien temperatur negatif menyebabkan *interface* dalam cairan meningkat sehingga terjadi ketidak stabilan sehingga terbentuk dendrit.

Transformasi keadaan *liquid-solid* dalam proses pengecoran logam disebut proses solidifikasi, cepat atau lambatnya solidifikasi dalam pengecoran dikontrol oleh laju pendinginan. Temperatur dan tekanan solidifikasi merupakan dua parameter termodinamika yang sangat penting untuk mengontrol terbentuknya porositas dan sifat mekanik produk coran aluminium paduan. Semakin tinggi laju pendinginan maka proses solidifikasinya semakin cepat dan sebaliknya. Disamping itu, biasanya laju pendinginan pada pengecoran paduan aluminium digunakan untuk mengontrol pembentukan *secondary dendrite arm spacing* (SDAS). Menurut Colas [32], laju pendinginan tinggi biasanya menghasilkan SDAS yang *fine* (26,6 μm) dan laju pendinginan rendah menghasilkan SDAS yang *coarse* (79,06 μm). Dari hasil pengamatan SEM resolusi tinggi Rozman [35] menyatakan, hanya laju pendinginan cepat yang memungkinkan membentuk fasa *quasycrystalline* dalam bentuk partikel yang terdispersi dalam matrik aluminium. Dan laju pendinginan lambat menghasilkan fasa intermetalik yang mempunyai kekerasan tinggi dengan keuletan rendah. Secara eksperimental laju pendinginan pengecoran logam digambarkan dengan bahan cetakan yang digunakan, seperti; cetakan pasir, cetakan permanen, dan cetakan tekan masing-masing menunjukkan kecepatan pendinginan lambat, sedang, dan cepat. Menurut Lavernia dan Srivatsan [36], kecepatan pendinginan pada pengecoran paduan aluminium dikelompokkan atas dua kategori, yaitu; 1). pendinginan lambat (<100 K/s), 2). pendinginan cepat (>100 K/s). Selain untuk mengontrol produktifitas

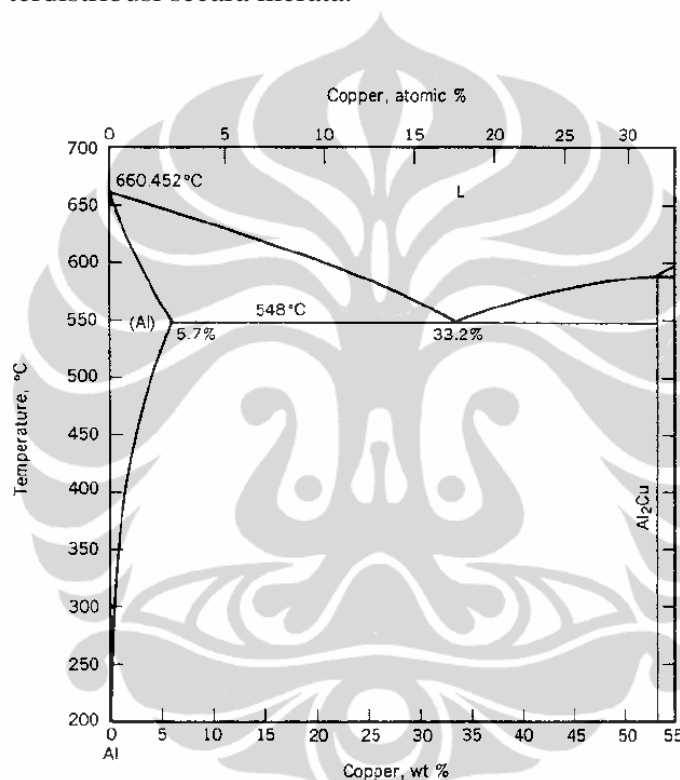
pengecoran, laju pendinginan juga dapat digunakan untuk mengontrol pembentukan metalografi (morfologi, jenis dan dimensi fasa, dll) yang berdampak pada sifat mekaniknya seperti disampaikan oleh Lee dan Hunt, Dobrzanski [4, 33]. Secara sederhana fasa yang terbentuk dalam transformasi liquid-solid paduan Aluminium-Tembaga dapat ditentukan dari diagram kesetimbangan Al-Cu (Gambar 2.3.), tetapi untuk mendapatkan hasil analisis yang akurat digunakan pengujian XRD, SEM, EDX dan lain-lain.

2.4. Diagram Fasa Paduan Al-Cu

Perlu dipahami bahwa transformasi *liquid-solid* untuk paduan Al-Cu adalah reaksi eutektik dan peritektik. Diagram fasa paduan Al-Cu ini tersusun atas unsur aluminium dan unsur tembaga yang tercampur secara mikrokopis, lihat Gambar 2.3. Didalam diagram fasa paduan ini terdapat tiga daerah yaitu daerah cair, daerah padat, dan daerah campuran (*mushy*), yang mana daerah padat terdiri dari fasa α (logam primer A), fasa β (logam primer B), fasa ganda (Al_2Cu), dan fasa dari unsur pengotor Fe yang membentuk intermetalik seperti $\text{Al}_{15}(\text{Fe},\text{Mg})_3\text{Si}_2$. Pada kurva pendinginan terdapat perbedaan antara diagram fasa paduan dengan diagram fasa logam murni, yang mana pada logam paduan pembekuannya terjadi pada kurun waktu (temperatur gradien) dan pada pembekuan logam murni tidak terjadi temperatur gradien. Nukleasi (*nucleation*) dan pertumbuhan butir (*grain growth*) merupakan peristiwa penting dalam mekanisme pembekuan paduan logam. Dalam pembekuan, umumnya nukleasi terbentuk secara merata diseluruh cairan logam dan berkembang dengan arah kristalografi tertentu sehingga terbentuk kristal-kristal bercabang menyerupai pohon cemara (*dendrit*). Pertumbuhan dendrit akan terhenti apabila terjadi kontak satu dengan lainnya dan cairan logam yang tersisa akan membeku pada rongga-rongga diantaranya.

Logam paduan cair yang dituang ke dalam rongga cetakan (permanen), nukleasi pertamanya akan terjadi pada dinding cetakan karena dinding tersebut mempunyai temperatur yang paling rendah. Nukleasi dapat juga dipercepat oleh adanya unsur atau pengotor yang tidak terlarut dalam paduan tersebut. Ancsin

[37] dalam penelitiannya menyatakan, dalam kondisi cair pada kesetimbangan, atom-atom Al dan Cu terdistribusi secara merata dan pemusatan gradien cenderung berkurang, selain itu segragasi gravitasi minor dapat dieleminasi dengan pengadukan. Kenyataannya tidak muncul fasa padat, sehingga pengadukan secara cepat digerakan dari atas ke bawah sebelum pembekuan untuk memastikan distribusi atomik yang merata. Jika cairan eutektik komponennya terdistribusi merata maka solidifikasinya terjadi secara cepat, sehingga komponen fasa padanyat terdistribusi secara merata.



Gambar 2.3. Diagram fasa paduan Al-Cu digambar Tiryakioglu [38]

Pada logam paduan, struktur kesetimbangan tergantung pada temperatur dan komposisi kimia. Diagram fasa paduan Al-Cu seperti paduan fasa paduan logam yang lain, yang menggambarkan struktur kesetimbangan sesaat untuk setiap kombinasi temperatur dan komposisi kimia. Diagram fasa paduan ini menjadi sangat penting dalam pengecoran karena perilaku logam paduan sangat berbeda dengan logam murni (aluminium). Informasi yang disampaikan oleh tambahan kedua solidifikasi *progressively* dan *directionally* dari dinding cetakan, paduan-paduan menunjukkan perilaku solidifikasi *equiaxed* yaitu solidifikasi yang dimulai diseluruh bagian cairan, membentuk daerah *mushy* yang terdiri kepulauan

equiaxed pada padatan. Kepulauan *equiaxed* ini dapat membuka blok *supply* logam cair dan paduan yang sulit diisi. Suatu upaya mengurangi pengaruh ini dengan memperpendek panjang daerah *mushy* sehingga menambah gradien termal (seperti, meningkatkan laju solidifikasi dengan menambah *chill*, dan lain sebagainya). Dalam pendekatan ini, masa panas menyebar keluar dan terdistribusi merata ke seluruh coran. Ini menyebabkan *shrinkage* terdistribusi menjadi porositas mikroskopik diseluruh volume coran. Kedua pendekatan ini, berpengaruh pada sifat-sifat mekanik yang kebanyakan diminimalis dengan ukuran kecil, bentuk bulat, dan menghasilkan dispersi yang merata. Aluminium murni dan paduan dengan rentang *short freezing* mempunyai persentase aluminium yang tinggi menunjukkan solidifikasi *directional* umumnya paduan eutektik seperti aluminium-silikon (11,6% Si) menunjukkan layaknya solidifikasi jenis eutektik. Paduan aluminium dengan rentang *long freezing*, lebih menunjukkan solidifikasi tipe *equiaxed*.

Informasi yang disampaikan oleh diagram fasa paduan Al-Cu adalah temperatur *liquidus-solidus*, koordinat dan reaksi eutektik. Istilah reaksi eutektik atau reaksi tiga fasa dalam sistem paduan logam menggambarkan temperatur terendah dari suatu paduan logam akan bertransformasi dari cair ke padat (solidifikasi) atau dari padat ke cair (*melt*). Fasa yang terjadi dalam sistem kombinasi temperatur dan komposisi kimia diagram fasa paduan dapat diprediksi dengan sistem pengungkit (*lever rule*), yaitu :

$$\frac{\text{banyaknya.fasa.}\alpha}{\text{banyaknya.cairan}} = \frac{C_1 - C}{C - C_\alpha} \quad (2.1)$$

yang mana C : komposisi paduan yang digunakan, C_1 : komposisi pada garis liquidus, C_α : komposisi pada garis solidus.

Reaksi eutektik yaitu reaksi yang terjadi pada temperatur terendah dari paduan tersebut. Dalam paduan Al-Cu reaksi eutektik terjadi pada 548,2 °C dengan paduan tembaga 33%, seperti yang terlihat dalam Gambar 2.3. Bertambahnya eutektik ke arah 100 % paduan logam hanya berisi logam cair yang menyebabkan material mengisi seluruh rongga dalam cetakan sehingga dihasilkan *soundness casting* (pengecoran yang baik). Umumnya paduan dengan rentang-pembekuan-panjang menunjukkan tekanan yang rendah seperti pada paduan 85Cu-

5Sn-5Zn-5Pb yang digunakan untuk *valve* dan *pitting pipe*. Dalam paduan Al-Mg, hasil observasi menyatakan meningkatnya lapisan porositas disebabkan bertambahnya unsur Mg, hal ini memberikan ilustrasi adanya masalah pertumbuhan dalam interdendritik yang meningkatkan rentang pembekuan. Segragasi unsur terlarut dalam sistem paduan Al-Cu yaitu tembaga dalam aluminium merupakan suatu kejadian yang spektakuler. Dalam keadaan setimbang eutektik tidak akan terjadi kecuali dengan kandungan tembaga mencapai 5,7%. Tetapi dalam eksperimen pengecoran, penambahan kandungan tembaga, eutektik akan terjadi pada konsentrasi tembaga rendah yaitu mendekati 0,5 – 0,8%. Konsentrasi ini berkaitan dengan puncak porositas, dan prediksi puncak tarikan hidrostatik dalam dalam zona *pasty (mushy)*.

2.5. Material Duralumin (Paduan Al-Cu)

a. Pengaruh Cu

Menurut Davis [8], paduan Al-Cu, mengandung 4 – 5% Cu, dengan *impurities* Fe dan Si, dalam paduan ini sering ditambahkan sedikit Mg dan termasuk paduan *heat-treatable* yang kekuatan dan keuletannya dapat mencapai nilai tertinggi (khususnya ingot yang dibuat dengan kandungan Fe kurang dari 0,15% Fe). Paduan Al-Cu merupakan paduan *phase* tunggal, tidak seperti paduan Al-Si yang tidak mempunyai fluiditas phase kedua pada solidifikasi yang lambat. Apabila diperoleh fasa kedua akan membantu mengisi daerah *shrinkage* dan mengkompensasi tegangan solidifikasi. Paduan Al-4.1Cu-0.6Mg-0.5Si sensitif terhadap penambahan mikropaduan Ag/Zr (0,44 dan 0,15%). Berdasarkan uji kekerasan, aging paduan Al-Cu-Mg-Si+Ag/Zr dan paduan konvensional Al-4.4Cu-0.5Mg-0.9Si-0.8Mn, menurut Basani dkk. [39], Ag memberikan kontribusi sifat mekanik yang lebih tinggi dibandingkan paduan yang hanya mengandung Si.

Aluminium paduan seri 2219 (Alclad 2219) mempunyai unsur kimia 5,8-6,8% Cu, 0,2-0,4% Mn, 0,02% Mg max, 0,2% Si max, 0,30% Fe max, 0,10% Zn max, 0,05-0,15% V, 0,02-0,10% Ti, 0,1-0,25% Zr, 0,05-0,15% unsur lain dan sebagai penyeimbang aluminium, paduan ini mempunyai densitas $2,84\text{g/cm}^3$ pada

20 °C. Paduan Al-Cu kadangkala mengandung Cu tinggi (7-8% Cu) yang digunakan untuk paduan aluminium tuang, karena penggunaannya sangat terbatas sekarang paduan ini digantikan oleh paduan Al-Cu-Si (untuk memperbaiki mampu tuang). Paduan Al-Cu tinggi secara intensif untuk mengatasi *impurities*. Tetapi, paduan ini mempunyai kekuatan rendah dan *castability*-nya kurang baik. Yang mana *castability* merupakan indikator yang sangat penting untuk menunjukkan keberhasilan proses pengecoran. Secara definisi *castability* dinyatakan sebagai kombinasi dari sifat logam cair dan karakteristik solidifikasi yang meningkatkan akurasi dan kualitas coran atau sebagai kemudahan logam cair mengalir melalui sebuah rongga cetakan atau *die*.

Sistem paduan *binary* dalam diagram paduan Al-Cu terdapat berbagai fasa *intermediate* seperti; CuAl_2 (C16-type tetragonal, disimbulkan θ), CuAl (monoclinic, η), Cu_5Al_4 (LT) (monoclinic, ζ), ϵ_2 (NiAs-type hexagonal), ϵ_1 (bcc), Cu_3Al_2 (rhombohedral, δ), Cu_9Al_4 (HT) (γ_0), Cu_9Al_4 (LT) (D83-type cubic, γ_1), and Cu_3Al (bcc, β). Yang mana, HT = *high-temperature* and LT = *low-temperature* mengacu pada Raghavan [40]. Paduan Al-Cu dengan kandungan 9-10% Cu penggunaannya sangat terbatas, paduan ini mempunyai kekuatan temperatur-tinggi dan ketahanan aus yang atraktif seperti digunakan dalam *aircraft cylinder head* dan piston dalam *automotive* dan blok silinder. Kekuatan temperatur-tinggi sangat baik apabila dalam paduan ini mengandung Cu, Ni, Mg dan kadangkala dengan besi dalam Ni.

Berbagai variasi paduan Al-Cu yang di deformasi plastik dengan tekanan tinggi menghasilkan peningkatan kekerasan seiring dengan bertambahnya persentase Cu dalam paduan tersebut dan akan mencapai puncaknya pada persentase tertentu. Setelah itu kekerasannya menurun seiring dengan penambahan persentase Cu dalam paduan tersebut Zhorin dkk. [41]. Paduan Al-Cu sering digunakan sebagai *base metal* pada paduan fasa Q (Al-Cu-Mg-Si). Sistem paduan Al-Cu-Mg-Si ini merupakan kelompok paduan komersil dan sifat-sifat utamanya akan muncul setelah *diquenching* dan *aging*. Terjadinya pengerasan dalam paduan ini diawali dengan terjadinya transformasi fasa β'' dan θ' . Menurut Ancsin [37], terhambatnya transformasi ke β'' dan β' (Mg_2Si) atau

fasa Q dalam sistem paduan Al-Cu dipengaruhi oleh jumlah Cu dan temperatur *annealing*.

b. Aplikasi

Umumnya paduan Al-Cu digunakan dalam industri-industri *aircraft*, *automotive*, dan militer, seperti; struktur pesawat, *aircraft landing*, penutup isolator, *gear box*, *cylinder head* dan piston, *turbine* dan *supercharger impellers*, *connecting rods*, *missile fins*. Paduan ini bersifat *heat-treatable* dan diproduksi untuk jenis *wrought* dan *cast alloys* yang dapat dituang dengan cetakan pasir, permanen, dan *investment*. Untuk penggunaan spesifik coran paduan Al-Cu harus diberikan perlakuan temper T-7 yaitu pengaturan pencelupan 10 min/jam pada 3,5% NaCl dengan tegangan 75% dari tegangan luluh selama 60 hari untuk mendapatkan ketahanan *stress corrosion cracking*. Ketahanan *hot cracking* dan penyusutan solidifikasi paduan Al-Cu kurang baik, sehingga untuk pengecoran kualitas tinggi diperlukan sistem kontrol paduan, *grain refining*, temperatur *melt*, dan *fluxing* yang ketat. Paduan Al-Cu mempunyai mampu mesin yang baik, dengan penambahan unsur Si dan dilanjutkan perlakuan T-4 mengakibatkan paduan ini menjadi lebih lunak sehingga digunakan dalam *riveting*. Keistimewaan lain paduan Al-Cu adalah dapat dilas dan digunakan untuk aplikasi pada rentang temperatur 270 °C sampai 300 °C.

Paduan berbasis Al-Cu dengan penambahan Li, Mg, dan Zr akan memperbaiki kekuatan spesifik, keuletan dan patah *toughness* tinggi, dan kekakuan yang tinggi. Dalam dunia industri paduan ini diusulkan sebagai bahan tanki penyimpanan propellant cair (tanki *cryogenic* dan tanki bawah tanah). Menurut Nayan dkk. [42], paduan Weldalite 049 dengan komposisi nominal 6,3% Cu-1,3% Li-0,4% Mg-0,14% Zr digunakan untuk kombinasi kekuatan dan ketangguhan tinggi. Paduan 2195(4,19% Cu, 0,95% Li, 0,29% Mg, 0,31% Ag, 0,122% Zr) mempunyai *fracture toughnes ratio* (FTR) yang tinggi dibandingkan paduan 2219. FTR adalah perbandingan ketangguhan patah pada temperatur *cryogenic* terhadap temperatur atmosfer mengacu pada Chen dkk. [43].

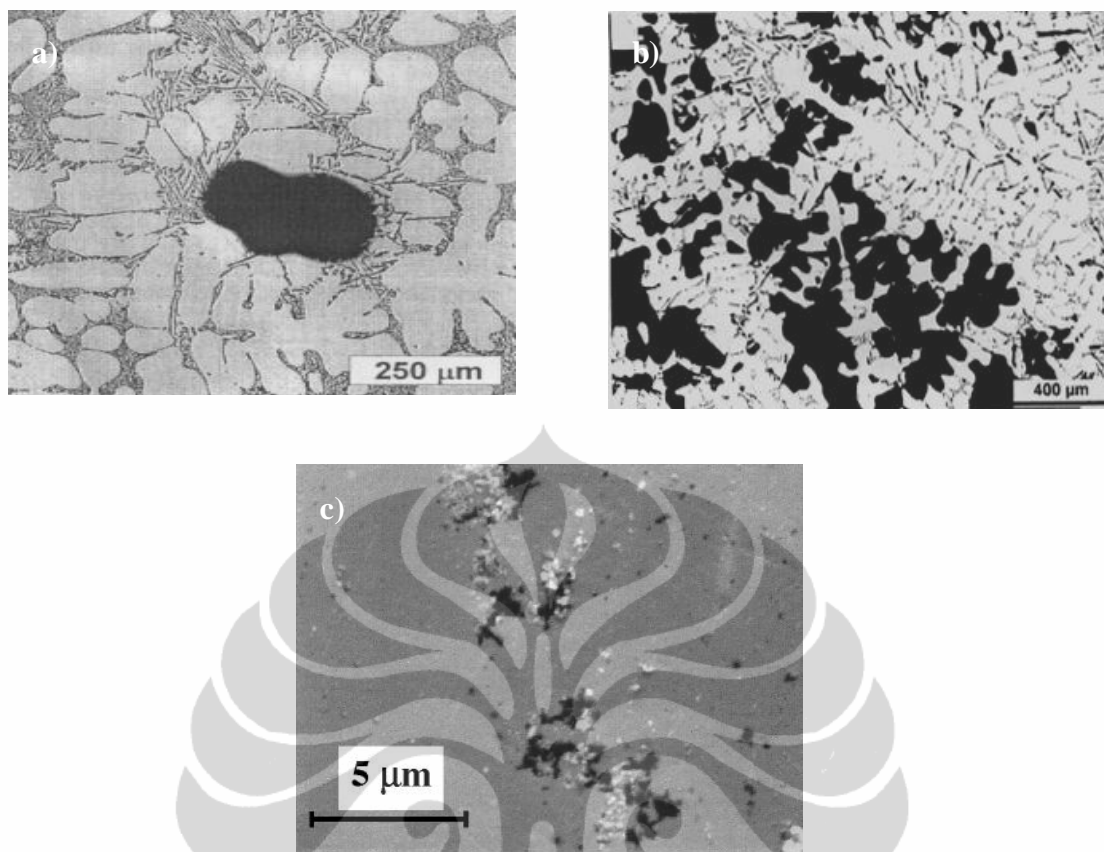
Komposisi paduan aluminium A2024-T3 adalah 4,8% Cu; 1,67% Mg; 0,58% Mn; 0,18% Fe; 0,07% Si; 0,02% Cr; 0,06% Zn; 0,15% Ti; sisanya Al. Sifat

mekaniknya $\sigma_{ys} = 380$ MPa, $\sigma_{ts} = 507$ MPa, $\varepsilon_f = 21,6\%$, $E = 77,02$ GPa. Menurut Kim dkk., Placido dkk. [44, 45] paduan aluminium ini banyak digunakan sebagai bahan struktur *aircraft* dan sudah dikomersilkan. Akhir-akhir ini, Rusia mengembangkan pipa bor paduan aluminium Al-Cu-Mg, sejenis paduan 2024. Untuk eksperimennya digunakan material standart Rusia GOST 4784, sejenis paduan aluminium 2024-T4 dengan komposisi 4,2% Cu; 1,5% Mg; 0,81% Mn; 0,33% Fe; <0,02% Ni; 0,012% Pb; 0,22% Si; 0,09% Zn; 0,025% Ti.

2.6. Morfologi Porositas Dalam Duralumin Cor

2.6.1. Definisi dan Identifikasi

Cacat pengecoran logam yang terjadi karena gas terlarut dalam logam melt dan terjebak pada proses solidifikasi disebut porositas gas, dan cacat pengecoran dapat terjadi karena penyusutan disebut porositas penyusutan (*shrinkage*). Pada umumnya, dalam logam cor porositas tersebut terbentuk secara terpisah atau merupakan kombinasi dari kedua jenis porositas tersebut. Berdasarkan bentuknya porositas gas mempunyai tipikal; bulat (*spherical*), terisolasi, permukaannya halus, dan tipikal porositas *shrinkage*; tidak beraturan dan bersudut, membuat jejaring (*network*), permukaannya kasar. Gambar 2.4, menunjukkan kedua jenis porositas gas dan porositas *shrinkage*. Menurut Campbell [46] ukuran porositas gas dikelompokan atas 3 bagian yaitu, 1). presipitas pori dari larutan berukuran 0,05-0,5 mm, 2). gelembung udara dari pengisian yang kurang berukuran 0,5-5 mm, dan 3). rongga gas (*blow hole*) dari pengikat berukuran 10-100 mm. Porositas coran logam yang terdapat diatas permukaan (*surface*) disebut porositas terbuka atau dibawah permukaan disebut porositas tertutup (*subsurface*). Cacat porositas berimplikasi menurunkan kualitas coran logam seperti, sifat mekanik, sifat kimia, sifat thermal dan elektrik, sifat fisik, dan sifat mampu bentuk.



Gambar 2.4. Porositas dalam coran logam, a). porositas gas [46], b). *Shrinkage* [47], c). Kombinasi porositas gas dan *shrinkage* [47]

Menurut Kalpakjian dan Schmid, Jostrad dan Rasmussen [48, 49] jika porositas berbentuk bulat (*spherical*), dindingnya halus (menyerupai lubang-lubang mengkilap keju Swiss), dan porositasnya tersebar diseluruh produk coran, umumnya porositas tersebut disebabkan oleh gas yang terjebak (hidrogen). Tetapi jika dindingnya kasar dan bersudut, porositas tersebut berasal dari *shrinkage* diantara dendrit. Gas terlarut dapat dihilangkan dari logam melt dengan *flushing*, atau dibersihkan dengan gas inert atau dengan peleburan dan solidifikasi vakum. Jika gas terlarut oksigen, logam *melt*-nya dioksidasi. Dalam pengecoran aluminium terdapat dua jenis porositas gas hidrogen, yaitu 1). porositas *interdendritic* yang terjadi karena kandungan gas hidrogennya cukup tinggi selanjutnya hidrogen tersebut dilepas saat solidifikasi dan menghasilkan tekanan kelarutan diatas tekanan atmosfer. 2). Porositas kedua (*secondary*) dalam ukuran mikro terjadi bila kelarutan gas hidrogennya rendah dan membentuk *void* yang

terkarakterisasi sebagai *subcritical*. Porositas gas hidrogen selalu ada dalam struktur tuang yang terintegrasi sebagai *void* yang menyebar dan berakibat menurunkan sifat-sifat mekanik. Deposit gas hydrogen dalam struktur solidifikasi tergantung pada tingkat kelarutan hidrogen dan kondisi solidifikasinya. Porositas hidrogen dapat dikontrol dari difusi *nucleation* dan *growth*, penurunan konsentrasi hidrogen, peningkatan laju solidifikasi sehingga pembentukan dan pertumbuhan *void* dapat ditekan. Menurut Melo [30] mikroporositas yang terjadi selama solidifikasi pengecoran disebabkan pelepasan gas dari logam cair atau ketidakmampuan logam cair mengisi saluran *interdendritic* akhirnya terkompensasi menjadi kerutan (*shrinkage*). Battaglia dan Rozot [50] dalam penelitiannya menyimpulkan, bentuk *micro-porosity* dibedakan dua macam yaitu;

- 1). porositas gas oleh kelarutan hidrogen dalam cairan tinggi. Selama solidifikasi hidrogen masuk kedalam bagian cair dan membentuk gelembung-gelembung, akibatnya disekeliling aluminium padat dikelilingi gelembung (porositas). Dalam pengecoran paduan aluminium gas nitrogen dapat mengeluarkan gas (*ungassing*).
- 2). Kontraksi volumetrik (*interdendritic*) saat solidifikasi disebut *shrinkage*. Metode *degassing* yang baik mengurangi hidrogen 0,06-0,1 ml/100 g. Dari eksperimen, porositas tidak akan terjadi dengan tingkat hidrogen dibawah 0,15 ml/100 g atau 1,5 ml/kg, atau tekanan ekuivalent solidifikasi 60 mmHg atau 0,08 atm.

2.6.2. Mekanisme Pembentukan Porositas

Porositas dikenal sebagai cacat coran terjadi karena ketidaksesuaian dalam proses pengecoran. Diawal pembekuan (solidifikasi) logam cair bagian permukaannya kontak dengan cetakan yang relatif dingin, dan solidifikasi terus berlanjut kedalam cairan sehingga membuka *channel* karena perbedaan densitas logam *melt* dan logam solid. Pembukaan *channel* terjadi karena adanya perbedaan densitas massa logam *melt* dan logam solid. Contoh, densitas massa aluminium *melt* $2,37 \text{ g.cm}^{-3}$ dan aluminium solid $2,55 \text{ g.cm}^{-3}$. Akibat pembukaan *channel* tekanan internal turun dan diakhir solidifikasi terbentuk pori oleh nuklasi didalam cairan logam. Setelah nuklasi solidifikasi yang berlanjut memicu pertumbuhan pori kearah sisi dalam dari pada kearah sisi luar permukaan coran. Pada umumnya

paduan aluminium, bronze, dan paduan eutetik Al-Si mempunyai *short-freezing-range* sehingga menghasilkan permukaan coran yang baik.

Pada pengecoran logam (padual Al-Cu), apabila tidak ada gas dan logam dituang kedalam rongga mencukupi, maka tidak ditemui adanya porositas dalam tuangan tersebut. Tetapi pada kenyataannya tidak demikian, pori internal dapat terbentuk dengan berbagai cara, seperti adanya ke komplekan pada pengecoran sehingga logam cair tidak dapat mengisi rongga cetak, dengan tegangan hidrostatik yang meningkat, sehingga tercapainya tingkat pembentukan pori internal. Analisa Fisher's untuk nukliasi gabungan porositas gas (hidrogen) dan penyusutan didasarkan pada tekanan gas (P_g) pada sisi dalam pori mendorong, dan tekanan negatif (P_s) pada *bulk melt* yang secara efektif menarik, sehingga dihasilkan tekanan akhir :

$$P_f = P_g + P_s \quad (2.2)$$

Persamaan 2.2. menggambarkan bagaimana porositas gas dan penyusutan berkoordinasi menghasilkan tekanan kritis untuk nukliasi. Bila kondisi ini dinyatakan dengan kesetimbangan mekanik pada gelembung berdiameter r dalam liquid pada tegangan permukaan γ , yang mana gelembung mempunyai tekanan internal P_i dan tekanan eksternal dalam liquid P_e , sehingga :

$$2 \gamma / r = P_i - P_e \quad (2.3)$$

Apabila pori mempunyai ukuran kritis, radius r^* , tekanan internal adalah tekanan gas P_g dalam kesetimbangan dengan liquid, dan tekanan eksternal P_e adalah tekanan (negatif) yang menyebabkan penyusutan $-P_s$, sehingga persamaan (2.3) analog dengan persamaan Fisher's :

$$2 \gamma / r^* = P_g - P_s \quad (2.4)$$

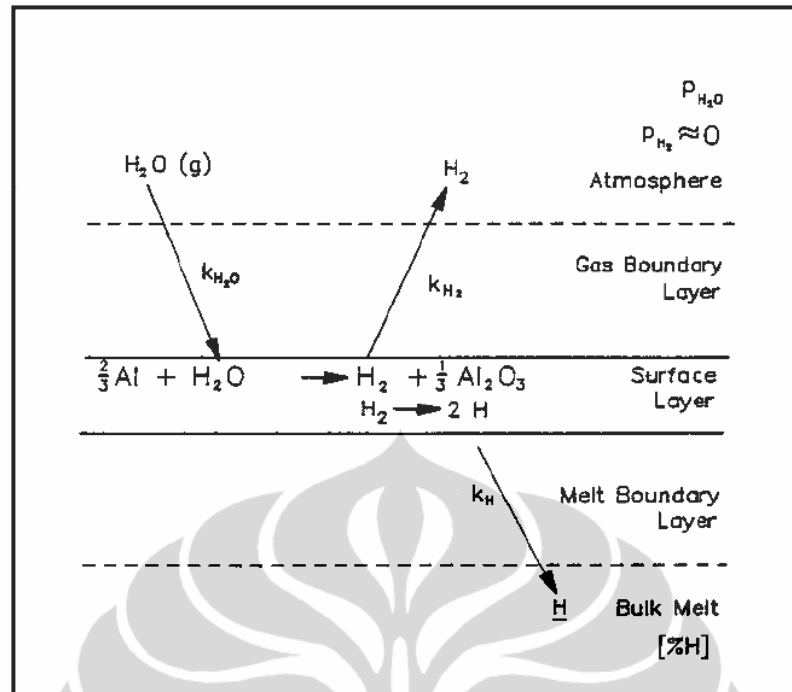
Battaglia dan Rozot [50] memprediksi pecahnya tekanan berbagai logam melt dapat diestimasi dari asumsi r yang mendekati satu atau dua diameter atomik. Aksi kerjasama kuantitatif porositas gas dan penyusutan dinyatakan dalam pers. 2.2 dan 2.3.

a. Porositas

Pada temperatur yang sama gas hidrogen mempunyai kelarutan yang tinggi dalam keadaan *melt* dari pada keadaan *solid* oleh karena itu porositas gas dapat terbentuk

selama solidifikasi. Gas hidrogen dihasilkan dari reaksi reduksi uap air dalam atmosfer oleh aluminium dan penguraian hidrocarbon. Gas hidrogen dalam aluminium *melt* dan *solid* akan meningkat oleh pengotor seperti campuran sulfur. Unsur-unsur pembentuk *hydride* dalam logam meningkatkan hidrogen dalam liquid. Menurut Colas [32] unsur-unsur *beryllium*, *copper*, *tin*, dan *silicon* dalam aluminium menurunkan gas hidrogen. Akan tetapi peneliti lain menghasilkan kondisi yang berbeda yaitu penambahan tembaga dan silikon meningkatkan jumlah porositas dalam pengecoran paduan aluminium seperti yang dinyatakan oleh Suzuki dkk., Park dkk., Whittenberger [13, 14, 51]. Dalam kondisi *melt* aluminium dan paduannya sangat mudah menyerap hidrogen karena temperatur kelarutan yang tinggi, dan berafinitas dengan oksigen. Secara prinsip hidrogen berasal dari kelembaban atmosfer (H_2O gas) yang kontak dengan aluminium *melt* bereaksi membentuk gas hidrogen diatomik (H_2) selanjutnya H_2 tersebut terurai menjadi monoatom H larut kedalam duralumin *melt*, kelarutan tersebut diformulasikan dengan reaksi (2.5) dan dilustrasikan dalam Gambar 2.5. Dalam proses solidifikasi, monoatomik H yang terlarut akan saling bereaksi menjadi atom H_2 selanjutnya atom tersebut saling bergabung menjadi pori (lubang) atau bersenyawa dengan unsur lain membentuk senyawa hidrida dengan aluminium seperti Na_3AlH_6 , jumlah dan besarnya pori ditentukan oleh kelarutan atom H dalam duralumin tersebut.



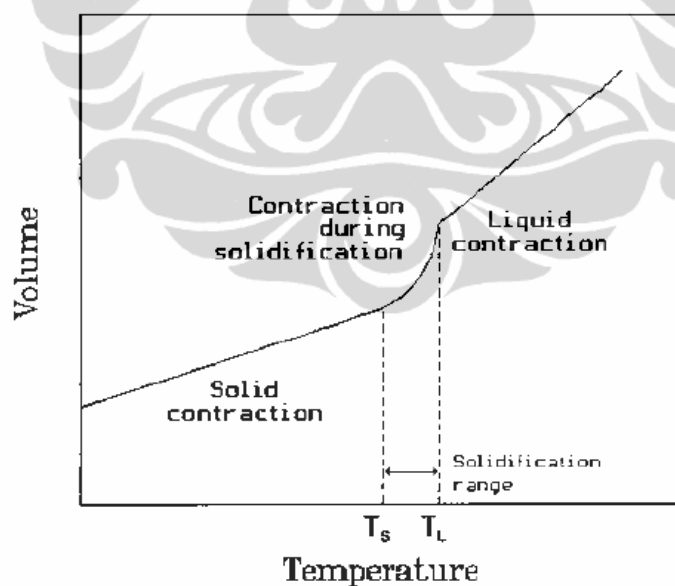


Gambar 2.5. Mekanisme penyerapan hidrogen dalam pengecoran aluminium [52]

Jenis-jenis paduan aluminium mempunyai sensitifitas yang berbeda terhadap penyerapan hidrogen berikut akibat porositas yang ditimbulkannya jika gas tersebut tidak dihilangkan. Menurut Colas [32] penambahan tembaga dan silikon mengurangi kelarutan hidrogen, dan magnesium meningkatkan kelarutannya. Dan konsekwensi menghilangkan hidrogen tergantung koefisien perpindahan massa. Macam-macam faktor kontrol termodinamik dan kinetik untuk menghilangkan hidrogen dari aluminium melt. Menurut Sigworth [53] hidrogen dihilangkan dengan cara :

- Memindahkan hidrogen dalam *melt* ke gelembung gas inert dengan cara konveksi dan difusi.
- Memindahkan difusi lapisan batas tipis gelembung.
- Penyerapan kimia diatas dan dilanjutkan *desorption* dari permukaan gelembung.
- Difusi hidrogen sisi dalam gas.
- Menghilangkan hidrogen dari permukaan *melt* atau dinding refraktori.

Menurut Campbell [46] porositas dalam paduan aluminium merupakan gabungan adanya gas hidrogen (masuk ketika aluminium cair dan terperangkap selama proses solidifikasi) atau karena terjadi kontraksi waktu pendinginan logam cair. Bentuk porositas dalam coran logam tidak beraturan (*irregular*) karena kombinasi kedua faktor tersebut, tetapi kemungkinan tersebut ditentukan porositas awal yang berbasis pada aspek penyebaran dan morfologi. Rongga *shrinkage* makroskopik besar diasumsikan karena kontraksi dan gabungan kesalahan rancangan pengisian (*feeding*), dan ketidakmampuan logam cair mengalir masuk ke daerah solidifikasi. Umumnya solidifikasi logam terbagi dalam tiga tingkat kontraksi seperti terlihat dalam Gambar 2.6.; pertama, cairan tidak mempunyai pengaruh yang drastis dalam pengecoran, dan normalnya hanya mengurangi ketinggian dalam *feeder*. Kedua, kontraksi solidifikasi disebabkan oleh beberapa masalah, dan disebabkan oleh perubahan struktur cairan terbuka masuk ke bagian solid yang lebih kompleks. Ketiga, kontraksi solidifikasi disebabkan karena perubahan temperatur dalam keadaan padat khususnya pada fasa-fasa yang terbentuk.



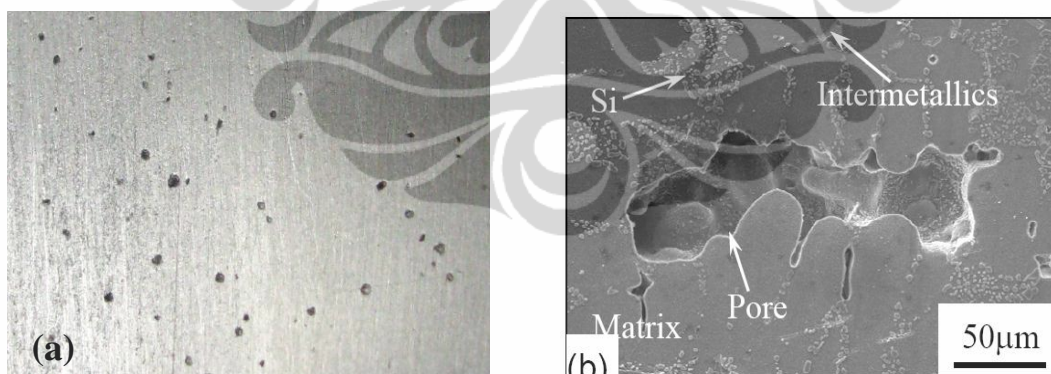
Gambar 2.6. Konstraksi dalam proses solidifikasi logam [32]

b. Terminologi *Gas Porosity* dan *Shrinkage*

Paduan aluminium, bronze, dan paduan eutetik Al-Si mempunyai *short-freezing-range* (waktu *feeding* singkat) sehingga menghasilkan permukaan coran

yang baik. Permukaan padat diawal pembekuan tingkat pertama, dan pengisian liquid berlanjut tanpa suatu rintangan membuka lebar-lebar *channel*. Pada akhirnya tekanan internal turun disebabkan oleh pengisian yang berkurang diakhir solidifikasi sehingga terbentuk pori karena nuklasi dibagian dalam liquid. Setelah nuklasi, solidifikasi yang berlanjut memberikan *driving force* pada pertumbuhan pori yang cenderung ke arah sisi dalam dibandingkan ke arah permukaan coran.

Menurut Kalpakjian dan Schmid, Jorstad dan Rasmussen [48, 49], apabila porositas berbentuk bulat (*spherical*), dindingnya halus dengan lubang-lubang mengkilap, dan porositasnya tersebar diseluruh produk coran, umumnya porositas tersebut disebabkan oleh gas yang terjebak (hidrogen). Tetapi jika dindingnya kasar dan bersudut, porositas berasal dari *shrinkage* diantara dendrit. Gas terlarut dapat dihilangkan dari logam *melt* dengan *flushing*, atau dibersihkan dengan gas inert atau dengan peleburan dan solidifikasi vakum. Jika gas terlarut oksigen, logam meltnya dioksidasi. Deoxidizer baja menggunakan; aluminium, silikon, paduan berbasis *copper* menggunakan bahan *phosphorus copper*, *titanium*, and *zirconium-bearing*. Secara metalografi bentuk fisik dari kedua jenis porositas tersebut dapat dilihat dalam Gambar 2.7.



Gambar 2.7. Cacat porositas pada pengecoran paduan aluminium, a). Distribusi porositas gas, b). Porositas penyusutan [46]

Dalam pengecoran aluminium terdapat dua jenis porositas gas hidrogen, yaitu 1). porositas *interdendritic* yang terjadi karena kandungan gas hidrogennya cukup tinggi selanjutnya hidrogen tersebut dilepas saat solidifikasi dan menghasilkan tekanan kelarutan diatas tekanan atmosfer. 2). Porositas kedua (*secondary*) dalam ukuran mikro terjadi bila kelarutan gas hidrogennya rendah

dan membentuk *void* yang terkarakterisasi sebagai *subcritical*. Porositas gas hidrogen selalu ada dalam struktur tuang yang terintegrasi sebagai *void* yang menyebar dan berakibat menurunkan sifat-sifat mekanik. Deposit gas hidrogen dalam struktur solidifikasi tergantung pada tingkat kelarutan hidrogen dan kondisi solidifikasinya. Porositas hidrogen dapat dikontrol dari difusi *nucleation* dan *growth*, penurunan konsentrasi hidrogen, peningkatan laju solidifikasi sehingga pembentukan dan pertumbuhan *void* dapat ditekan. Menurut Melo [30] mikroporositas yang terjadi selama solidifikasi pengecoran disebabkan pelepasan gas dari logam cair atau ketidakmampuan logam cair mengisi saluran *interdendritic* akhirnya terkompensasi menjadi kerutan (*shrinkage*).

Secara kuantitatif, jumlah porositas (%) coran logam diuji dengan *Picnometer* yang mengacu pada prinsip Archimedes mengacu pada Kang dkk. [21]. Dari uji *Picnometry*, porositas (kuantitatif) merupakan perbandingan selisih densitas duralumin (teoritis-cast) dan densitas duralumin teoritis kali 100%. Secara matematis porositas dirumuskan :

$$P = \frac{\gamma_{Tdural} - \gamma_{castdural}}{\gamma_{Tdural}} \times 100\% \quad (2.6)$$

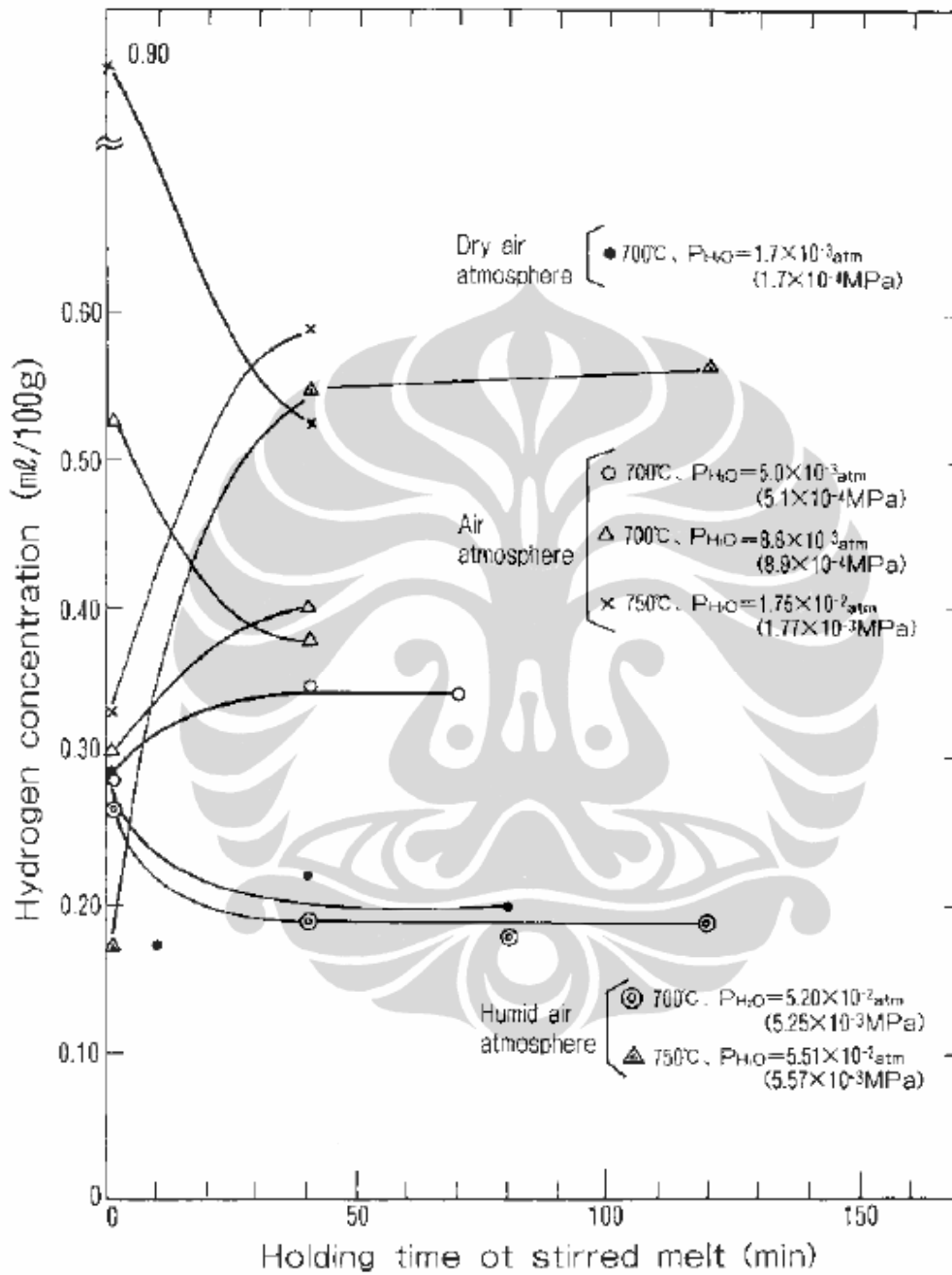
yang mana $\gamma_{castdural}$ diperoleh dari pengukuran berat spesimen di udara (W_a), berat spesimen+bucket dalam air (W_{sb}), berat bucket dalam air (W_b), selanjutnya hasil pengukuran berat tersebut dioperasikan secara matematis sebagai berikut :

$$\gamma_{castdural} = \frac{W_a}{W_a - (W_{sb} - W_b)} \times \gamma_w \quad (2.7)$$

yang mana γ_w : densitas air destilasi.

Menurut Battaglia dan Rozot [29], bentuk *micro-porosity* dibedakan dua macam yaitu; 1). porositas gas oleh kelarutan hidrogen dalam cairan tinggi. Selama solidifikasi hidrogen masuk kedalam bagian cair dan membentuk gelembung-gelembung, akibatnya disekeliling aluminium padat dikelilingi gelembung (porositas). Dalam pengecoran paduan aluminium gas nitrogen dapat mengeluarkan gas (*degassing*). 2). Kontraksi volumetrik (*interdendritic*) saat solidifikasi disebut *shrinkage*. Metode *degassing* yang baik mengurangi hidrogen 0,06-0,1 ml/100 g. Dari eksperimen, porositas tidak akan terjadi dengan tingkat

hidrogen dibawah 0,15ml/100g atau 1,5 ml/kg, atau tekanan ekuivalent solidifikasi 60 mmHg atau 0,08 atm.



Gambar 2.8. Hidrogen larut dalam aluminium *melt* [54]

Secara eksplisit dikatakan bahwa uap air yang terdapat di udara, *crucible*, dan *as-cast* akan terurai menjadi H_2 dan O_2 , selanjutnya H_2 larut dalam logam cair membentuk porositas dan O_2 membentuk lapisan oksida pada logam. Jumlah uap air di udara sangat bervariasi tergantung lokasi, suhu, dan waktu. Di padang

pasir dan pada suhu rendah, kandungan uap air kurang dari 0,1% volume, tetapi untuk daerah panas dan lembab uap air di udara dapat mencapai 6%. Proses sirkulasi yang kontinyu sampai H₂ terbawa gas masuk dalam kesetimbangan H₂ terlarut dalam logam cair. Selain temperatur pemanasan dan peleburan kelarutan hidrogen dalam aluminium juga ditentukan oleh lamanya kedua proses tersebut seperti terlihat dalam Gambar 2.8. Tekanan parsial H₂ terbawa gas diukur secara langsung dengan sensor konduktivitas panas. Secara simultan temperatur logam cair terukur, konsentrasi hidrogen terlarut dalam logam cair dihitung dengan hukum Sievert's ;

$$[H] = S_o * \sqrt{P_{H_2}} * CF(A) * CF(T) \quad (2.8)$$

yang mana S_o : kelarutan H₂ dalam aluminium murni pada 973K (0,92 ml/100 g), P_{H₂} : tekanan parsial H₂ yang terbawa gas inert, CF(A) : faktor koreksi untuk komposisi paduan. Nilai CF(A) = 1 untuk aluminium murni dan CF(A) ditentukan dalam persamaan; $\log CF(A) = 0,0170\% \text{ Mg} - 0,0269\% \text{ Cu} - 0,0119\% \text{ Si}$ dan CF(T) merupakan faktor koreksi untuk temperatur melt, yang dinyatakan dengan;

$$\log CF(T) = -2760/T + 2,837 \quad (2.9)$$

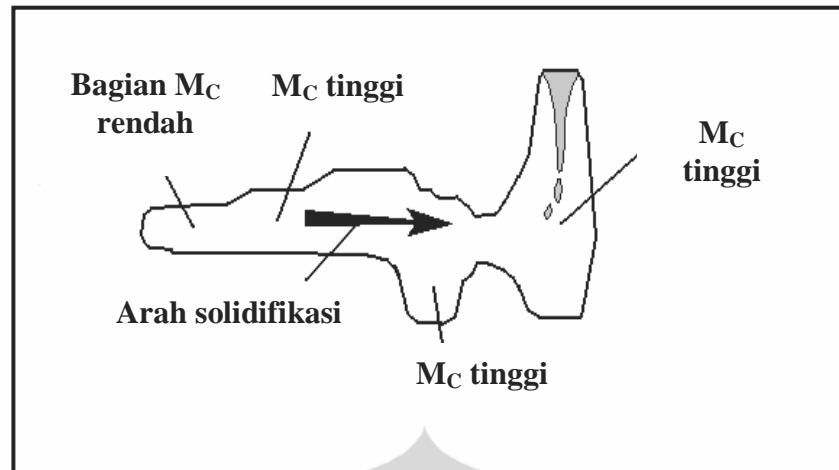
2.7. Simulasi Porositas Dalam Pengecoran Duralumin

Simulasi porositas merupakan metode deduksi untuk memprediksi porositas yang terjadi pada produk-produk pengecoran tanpa harus melakukan eksperimen. Metode prediksi porositas dengan lebih mudah dan murah dari metode eksperimental. Memprediksi porositas dalam proses pengecoran dengan model simulasi (analitik) dengan *quality assurance* harus memperhatikan aspek makrokopis dan mikrokopis proses solidifikasinya. Yang mana aspek makrokopis untuk mengetahui fenomena transport liquid-solid dan aspek mikrokopis untuk mengetahui evolusi mikrostruktur dan aliran fluida interdendrit dalam proses solidifikasi.

Secara prinsip pengecoran logam terdiri dari 3 proses utama yaitu; 1). proses peleburan, 2). proses penuangan, dan 3). proses pembekuan. Dibalik proses pengecoran sederhana tersebut ternyata terdapat beberapa reaksi kimia dan

transformasi fasa yang terjadi secara bersamaan dan rumit. Apabila penanganan reaksi kimia dan transformasi fasa tersebut tidak tepat akan menimbulkan permasalahan yang fatal pada produk pengecoran, seperti penurunan kualitas sampai produk coran dilebur ulang (*remelt*). Dalam proses peleburan terjadi transformasi *solid-liquid* yang berdampak pada perubahan geometri cetakan terhadap produk cor. Porositas sebagai salah satu jenis cacat pengecoran mempunyai fenomena pembentukan yang kompleks, dimana ukuran akhir dan distribusi rongga porositas tersebut ditentukan oleh beberapa parameter proses yang saling berinteraksi. Pendekatan eksperimental untuk penanganan kasus cacat pengecoran termasuk porositas membutuhkan waktu yang lama dan biaya besar. Perkembangan teknologi komputerisasi memberikan keuntungan yang besar untuk memprediksi dan memvisualisasi proses dan cacat (*shrinkage*) dalam proses pengecoran logam khususnya paduan Al-Cu.

Gating system yang baik merupakan salah satu kunci keberhasilan untuk membuat produk pengecoran berkualitas tinggi. Dengan kata lain *gating system* merupakan faktor penting untuk mendapatkan produk pengecoran berkualitas tinggi karena sebelum logam *melt* memenuhi rongga cetakan terlebih dahulu logam *melt* tersebut mengalir melalui *gating system*. Potensi cacat biasanya terjadi akibat kesalahan desain yang mengakibatkan aliran logam cair tidak optimal. Pada aluminium, pembekuan juga dapat menjadi faktor penentu besarnya cacat yang timbul. Untuk mendapatkan desain yang baik, umumnya mengikuti beberapa aturan dalam pembuatan *gating system*. Sub-bab simulasi ini dimaksudkan untuk mengestimasi cacat pengecoran (porositas gas dan *shrinkage*) yang terjadi akibat dari parameter proses pengecoran (bahan baku, pemanasan dan bahan cetakan, temperatur dan tinggi penuangan, dan dimensi *casting product*). Menghitung sebuah "modulus efektif", atau "modulus termal", dari hasil simulasi dari sebuah casting *unrigged*. Pendekatan ini memberikan nilai modulus setara terhadap perbandingan volume terhadap luas permukaan untuk setiap titik dalam casting, tergantung pada bagaimana solidifikasi casting. Ini jauh lebih akurat daripada pendekatan tradisional mengestimasi volume dan daerah permukaan casting melalui perhitungan manual, karena memperhitungkan proses dinamika, seperti kejenuhan panas, dan lain-lain.



Gambar 2.9. Mekanisme solidifikasi pengecoran [55]

Modulus cor (MC) adalah sifat dasar pada proses pengecoran, yang berhubungan dengan lamanya waktu pembekuan logam cor dalam cetakan. Disamping MC untuk menggambarkan perbandingan volume dan luas permukaan *casting*, atau dari berbagai bagian *casting* lihat Gambar 2.9. Menurut aturan Chvorinov, tiap bagian *casting* yang memiliki modulus lebih tinggi (perbandingan volume dengan luas permukaan kontak) akan membekukan terakhir, sedangkan bagian dengan nilai modulus yang lebih rendah akan membeku terlebih dahulu. Idealnya *casting* menjalani arah solidifikasi menuju *riser* (atau *feeder*), umumnya bagian *casting* yang memiliki nilai modulus tertinggi harus terpasang riser. Untuk mendapatkan *sound casting* yang baik maka modulus *riser* harus sama atau lebih besar dari *casting* terpasang. Secara teoritis, kontraksi diijinkan terjadi pada bagian *casting* yang membeku dan diberi *feeding* oleh genangan logam *melt* pada *riser*, dengan demikian penyusutan akan tereliminasi, seperti dalam Gambar 2.9. Nilai modulus pengecoran digunakan untuk memastikan bahwa *feeder* akan tetap cair memasuki bagian *casting* yang lebih panjang. Modulus pengecoran sering digunakan untuk menganalisis terjadinya *shrinkage* yang disebabkan oleh kegagalan fungsi *riser* untuk mengkompensasi penyusutan produk cor. Secara geometri, modulus pengecoran merupakan perbandingan volume logam cair dengan luas penampang. Temperatur solidifikasi setiap logam berbeda satu dengan lainnya. Struktur paduan terdiri dari tiga bagian yaitu larutan padat, senyawa antar logam, serta logam murni masing-masing bagian tersebut

memiliki temperatur solidifikasi yang berbeda. Secara matematis modulus pengecoran (M_C) dirumuskan :

$$M_C = \frac{V}{S} \quad (2.10)$$

yang mana V = Volume [cm^3], S = luas permukaan pendinginan [cm^2].

Kebanyakan transformasi logam cair ke padat disertai dengan penurunan volume. Pada paduan aluminium, penyusutan volumetrik yang terjadi selama pembekuan berkisar 3,5-8,5% ini penyusutan ini lebih besar dari material yang lain. Artinya paduan aluminium mempunyai kecenderungan yang tinggi untuk mengalami *shrinkage* terkait dengan kedua fraksi volume cair/padat pada saat akhir solidifikasi, dan kisaran suhu solidifikasi dari paduan tersebut. Ketika praktek pengecoran yang baik menggunakan komposisi jarak solidifikasi yang panjang seperti paduan aluminium-tembaga dan aluminium magnesium, berkurangnya jarak solidifikasi ini sangat penting dalam penyusutan interdendritik. Proporsi yang tinggi menyebabkan paduan ini rentan terhadap *microporosity* karena perbandingan *feeding* tinggi yang terjadi secara *interdendritical*. Masalah *shrinkage* bertambah oleh kompleksitas geometri, seperti ketebalan yang bervariasi, laju pembekuan, karakteristik *feeding* dari paduan, dan keterbatasan efektivitas *gating* dan *risering* yang sering gagal dalam praktek untuk memberikan gradien yang diperlukan selama solidifikasi berlangsung.

Umum komponen *gating system* disusun menurut urutan aliran logam *melt* masuk ke rongga cetakan, yaitu *pouring basin*, *sprue*, *well*, *runner*, dan *ingate*. *Feeding/riser* ditambahkan pada area tertentu untuk mencegah penyusutan. Beberapa hal yang menjadi karakteristik dalam desain *gating system* diantaranya:

- | | |
|-------------------------------|-------------------------------|
| a). <i>Fluidity</i> | h). <i>Turbulence</i> |
| b). <i>Metallostatic head</i> | i). <i>Bulk turbulence</i> |
| c). <i>Viscosity</i> | j). <i>Surface turbulence</i> |
| d). <i>Surface tension</i> | k). <i>Incomplete filling</i> |
| e). <i>Heat diffusivity</i> | l). <i>Solid inclusion</i> |
| f). <i>Back pressure</i> | m). <i>Gaseous entrapment</i> |
| g). <i>Friction</i> | |

Turbulensi yang terjadi pada saat menuangkan logam *melt* dapat mempercepat laju penyerapan gas hidrogen dari atmosfer yang mengandung uap air (lembab). Seperti disebutkan dalam Sub BAB 2.1. bahwa kualitas pengecoran paduan aluminium (duralumin) sangat dipengaruhi unsur makro dan mikro dalam udara. Contoh, magnesium yang armorf dapat terjadi pada paduan aluminium yang mengandung magnesium kurang protektif terhadap difusi hidrogen dari udara. Oleh karena itu kelembaban yang tinggi menambah permasalahan yang dihadapi dalam penanganan kontaminasi terhadap hidrogen dan paduan yang mengandung magnesium lebih rentan terhadap penyerapan hidrogen dan oksigen dari pada yang lain. Dari semua hal di atas, fluiditas dan turbulensi merupakan faktor utama untuk mendapatkan desain *gating system* yang optimal. Disamping itu duralumin mempunyai berat jenis yang lebih tinggi dari paduan aluminium yang lain sehingga fluiditas duralumin turun akibatnya waktu *feeding* lama.

Secara analitis volume dan berat duralumin *melt* yang dibutuhkan untuk mengisi rongga cetakan (*feeding*) dihitung berdasarkan; volume *casting product*, volume *pouring basin*, *gating system*, dan *riser*. Hukum Bernoulli untuk menggambarkan kesetimbangan dalam proses *pouring* meliputi; energi statis, energi kinetik, energi geodetik seperti dalam persamaan (2.11). Sifat hidrodinamik duralumin cair sensitif terhadap perubahan temperatur dan berpengaruh terhadap viskositas (energi kinetik). Persamaan (2.12) menunjukkan formulasi bilangan Reynolds untuk menginformasikan ada/tidak adanya olakan dalam aliran.

$$h + \frac{P}{\rho \cdot g} + \frac{V^2}{2 \cdot g} = c \quad (2.11)$$

$$\text{Re} = \frac{V \cdot D \cdot \rho}{\mu} \quad (2.12)$$

Waktu yang diperlukan untuk menuang aluminium cair sampai rongga terisi penuh didasarkan pada kontinuitas yaitu :

$$Q = v \times A \times t \quad (2.13)$$

yang mana Q = volume aluminium cair yang dibutuhkan [dm^3], v = kecepatan aluminium cair mengisi rongga cetakan [$\text{dm} \cdot \text{s}^{-1}$], dan A = luas penampang *gating system* [dm^2]. Penentuan jenis porositas *shrinkage* didasarkan Kriteria Niyama:

$$N = G / \sqrt{\dot{T}} \quad (2.14)$$

yang mana G = gradien temperatur (temperatur tuang ke temperatur solidifikasi), dan \dot{T} = laju pendinginan [C/s.].

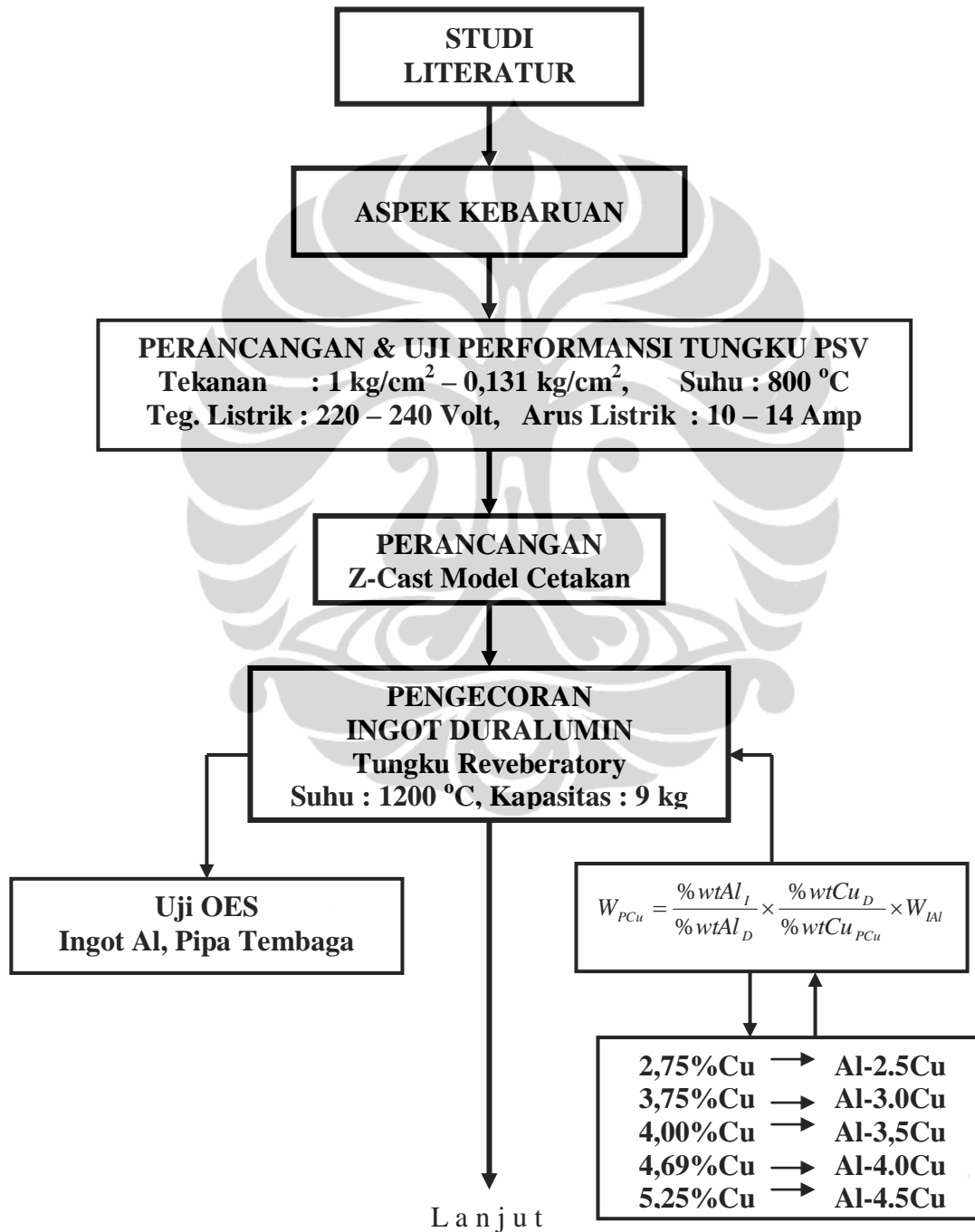
Menurut Finite [55], model pertumbuhan pori porositas ditentukan oleh kecepatan hidrogen berdifusi pada porositas/antar muka cairan. Prediksi porositas dengan model solidifikasi dengan mempelajari pengaruh hidrogen, kecepatan pendinginan menunjukkan ukuran butir pori yang seragam. Komparasi jumlah porositas gas dari pemodelan biasanya lebih besar dari eksperimental mengacu pada Girard dkk. [56]. Karena prinsip dasar porositas terbentuk dan berkembang sejalan dengan pengaruh termal dan pergerakan solidifikasinya. Radius porositas gas (*spherical*) untuk material dengan volume tertentu dipengaruhi oleh kondisi atau batasan seperti;

- Konsentrasi hidrogen fasa liquid pada antar muka porositas, yang setimbang dengan tekanan gas hidrogen pada porositas (P_g) sesuai dengan Sievert's Law.
- Flux hidrogen diluar radius pori diabaikan.

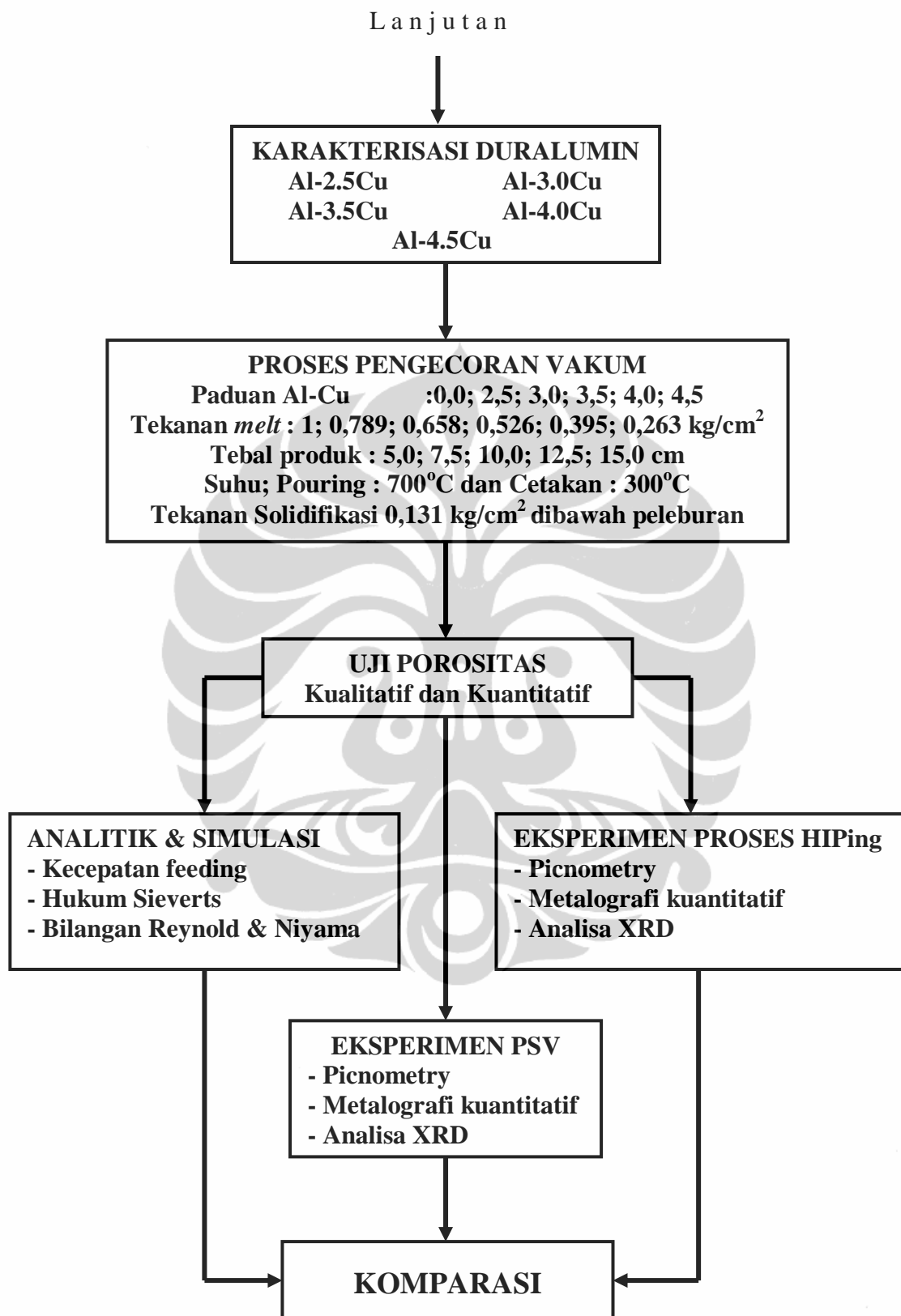
BAB III METODE PENELITIAN

3.1. Rancangan Penelitian

Urutan kegiatan penelitian disertasi ini dilaksanakan mengikuti diagram alir, seperti terlihat dalam Gambar 3.1.



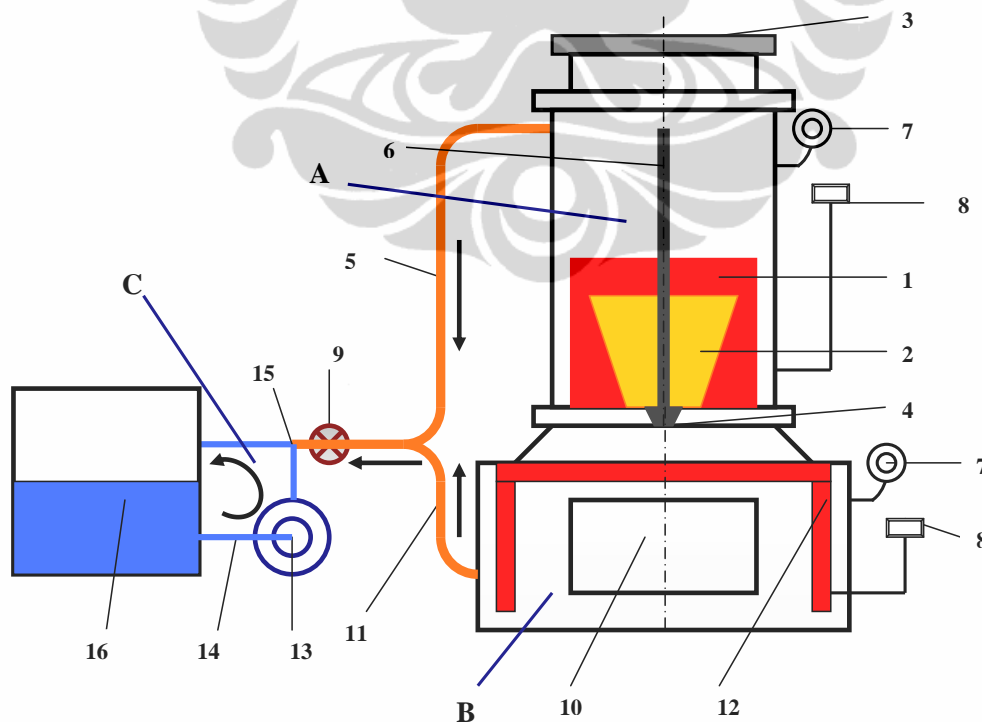
Gambar 3.1. Diagram alir penelitian



Gambar 3.1a. Diagram alir penelitian (lanjutan)

Kegiatan ke-satu, studi pustaka adalah kegiatan untuk menelaah hasil-hasil penelitian dan kajian (jurnal, buku, dan laporan) yang berkaitan dengan topik “*degassing* pada pengecoran paduan aluminium”. Dalam telaah tersebut peneliti menemukan aspek kebaruan *degassing* yaitu proses pengecoran (*melting*, *pouring*, dan *solidification*) duralumin yang dilakukan pada tekanan vakum (kg/cm^2). Dari aspek kebaruan ini peneliti menyusun hasil-hasil penelitian orang lain dan rencana penelitian yang akan dilakukan oleh peneliti dalam bentuk perjalanan penelitian (*road map*).

Kegiatan ke-dua, terdiri dari perancangan, manufaktur, dan uji performansi tungku pengecoran sistem vakum (PSV), tungku PSV ini digunakan untuk pengecoran ulang ingot duralumin. Dalam uji performansi tungku PSV dilakukan pengamatan pada temperatur dan tekanan vakum sebagai parameter utama proses pengecoran duralumin (lihat lampiran 1). Kontrol temperatur dan tekanan vakum dilakukan pada pengecoran duralumin yang meliputi proses-proses; peleburan, penuangan, dan solidifikasi. Skema dan hasil manufaktur tungku PSV masing-masing seperti dalam Gambar 3.2., dan Gambar 3.3.



Gambar 3.2. Skema pengecoran sistem vakum [56]

Keterangan Gambar 3.2.

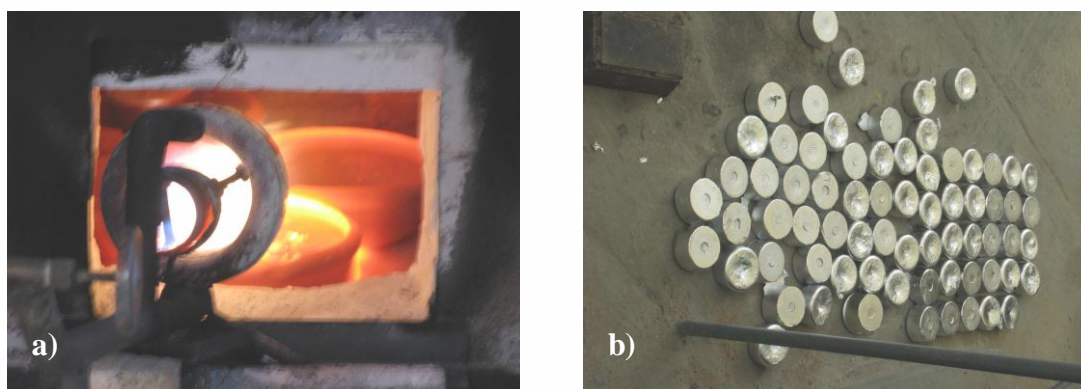
Pengecoran sistem vakum (PSV) dirancang untuk mengurangi cacat pengecoran yang disebabkan oleh porositas gas khususnya pada pengecoran paduan aluminium. Di dalam PSV ini terdapat tiga komponen utama yaitu ; A). Ruang peleburan yang terdiri dari 1). selongsong keramik dan elemen pemanas listrik, 2). mangkok 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). *stop valve*. B). Ruang solidifikasi terdiri dari cetakan produk (spesimen), 10). lubang masuk-keluar cetakan, 11). saluran pipa vakum, 12). elemen pemanas listrik, C). Komponen vakum terdiri dari 13). pompa air, 14). pipa saluran air, 15). *nozzle* dan pipa kapiler, 16). reservoir air. Cara kerja atau operasi PSV seperti dijelaskan dalam prosedur operasi tungku vakum lihat sub-bab 3.2.



Gambar 3.3. Tungku pengecoran sistem vakum

Kegiatan ke-tiga (Penelitian 1), pengecoran duralumin dengan cara meleburkan *as-cast* ingot aluminium 99,5% Al (uji OES), dan pipa tembaga 98,5% Cu (uji OES) secara bersamaan pada mangkok tembikar dalam tungku *reveberatory*. Tungku *reveberatory* dibuat dari susunan batu tahan api dapat

dioperasikan sampai suhu 1200 °C. Sumber panas tungku reverberatory adalah *flame* hasil pembakaran bahan bakar *kerosene* (minyak tanah). Kapasitas maksimum tungku *reverberatory* 6 mangkok tembikar (6 x 250g bahan baku duralumin). Ingot duralumin dan tungku pengecoran reverberatory dapat dilihat pada Gambar 3.4. Pengecoran paduan Al-Cu dilakukan pada kondisi atmosfer dan potongan tembaga ditambahkan kedalam aluminium untuk mendapatkan ingot duralumin dengan kandungan masing-masing 2,5% Cu; 3,0% Cu; 3,5% Cu; 4,0% Cu; dan 4,5% Cu dan ditulis sebagai Al-2.5Cu, Al-3.0Cu, Al-3.5Cu, Al-4.0Cu, dan Al-4.5Cu. Untuk memperkecil bilangan Niyama, duralumin *melt* sebelum dituang kedalam cetakan permanen suhunya diturunkan terlebih dahulu menjadi ± 700 °C. Untuk mencegah terjadinya panas kejutan cetakan dipanasi terlebih dahulu sampai suhu 200 °C. Selanjutnya tuangkan duralumin *melt* kedalam cetakan ingot (bahan baku penelitian) dan cetakan *casting product* (spesimen). Proses berikutnya, menguji unsur kimia ingot duralumin dan menghitung berat jenis teoritis ingot duralumin tersebut dengan pendekatan kesetimbangan massa unsur (MB). Hasil uji unsur dan perhitungan berat jenis teoritis ingot duralumin seperti dalam Tabel 4.1. Selanjutnya lakukan karakterisasi spesimen yang meliputi; fisik (kuantitas porositas) dan metalografi (*image*). Uji kuantitas porositas dilakukan dengan Picnometer (basis hukum Archimedes), dan uji *image* porositas dengan OM, SEM, *X-ray radiography*, bidang yang diamati adalah; morfologi dan dimensi (porositas dan mikrostruktur). Hasil uji kuantitas porositas dan *image* masing-masing dapat dilihat dalam Gambar 4.1. dan Tabel 4.2.



Gambar 3.4. Pengecoran duralumin
a). Tungku reverberatory b). Ingot duralumin

Kegiatan ke-empat (Penelitian 2), penelitian 2 ini terdiri dari 4 sub-kegiatan antara lain; 1). memodelkan mekanisme porositas pengecoran sistem vakum (PSV) secara matematis, 2). membuat master proses *hot isostatic pressing* (HIPing), 3). mengecor ulang (*remelt*) ingot duralumin dalam tungku PSV, dan 4). menguji porositas (kuantitas dan image) spesimen hasil cor tungku PSV. Masing-masing sub kegiatan tersebut diuraikan sebagai berikut :

Sub-kegiatan 4.1., memodelkan mekanisme pembentukan porositas secara matematis berdasarkan persamaan-persamaan empiris dan teoritis. Pemodelan porositas ini dengan menghubungkan dan memperhitungkan parameter proses pengecoran (seperti; tekanan dan % tembaga) dengan sifat termodinamika dan sifat hidrodinamika material duralumin (*solid-melt*). Selama ini variabel tekanan diabaikan karena proses pengecoran dilakukan pada tekanan atmosfer (1 atm). Sub-kegiatan 1 ini untuk memprediksi jenis dan dimensi porositas (*shrinkage*, gas hidrogen) yang terjadi dalam PSV.

Sub-kegiatan 4.2., merancang dan *manufacturing* mesin *hot isostatic pressed* (HIPing) dan cetakan proses HIPing. Dalam eksperimen ini, spesimen hasil pengecoran duralumin diproses HIPing pada tekanan 100 MPa, suhu 540 °C, dan waktu pengepresan 2 jam seperti yang dilakukan Dash dan Makhlouf, Zhorin dkk. [31, 41]. Selanjutnya hasil proses HIPing tersebut digunakan sebagai spesimen berat jenis teoritis. Gambar 3.5. menunjukkan komponen-komponen dalam sistem kerja proses HIPing.

Proses HIP

Peralatan proses HIP terdiri dari satu unit cetakan (*dies and punch*) yang dilengkapi dengan system pemanasan, press hidrolik dengan manometernya, dan kerangka sistem mesin press. Komponen proses HIP terdapat dalam Gambar 3.5. dengan prosedur kerjanya sebagai berikut :

1. Memasukan benda kerja kedalam cetakan, dan menurunkan *punch* sampai menyentuh permukaan benda kerja (manometer menunjukkan angka nol).
2. Mengoperasikan sistem pemanas dalam mesin press (setting pada temperatur 540 °C).
3. Melakukan penekanan dengan Jack hydraulic sampai tekanan 100 MPa.

4. Mengontrol dan mempertahankan proses HIP selama 120 menit pada tekanan 100 MPa, suhu 540 °C.
5. Membuang tekanan *Jack hydraulic* sehingga *punch* terangkat keatas dan mengeluarkan benda kerja (hasil proses HIP).
6. Melakukan penimbangan berat dan pengukuran volume hasil proses HIP.



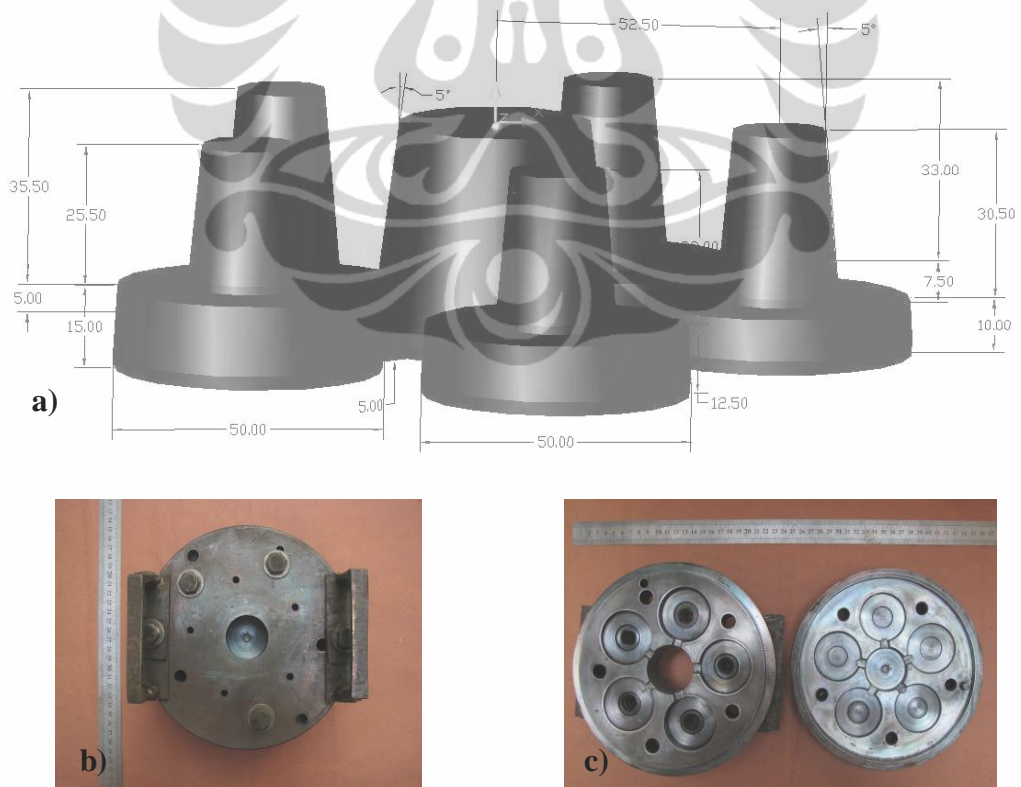
Gambar 3.5. Sistem proses HIP

a). Cetakan HIP, b). Unit pemanas, c). Sistem mesin press, d). Temperatur proses

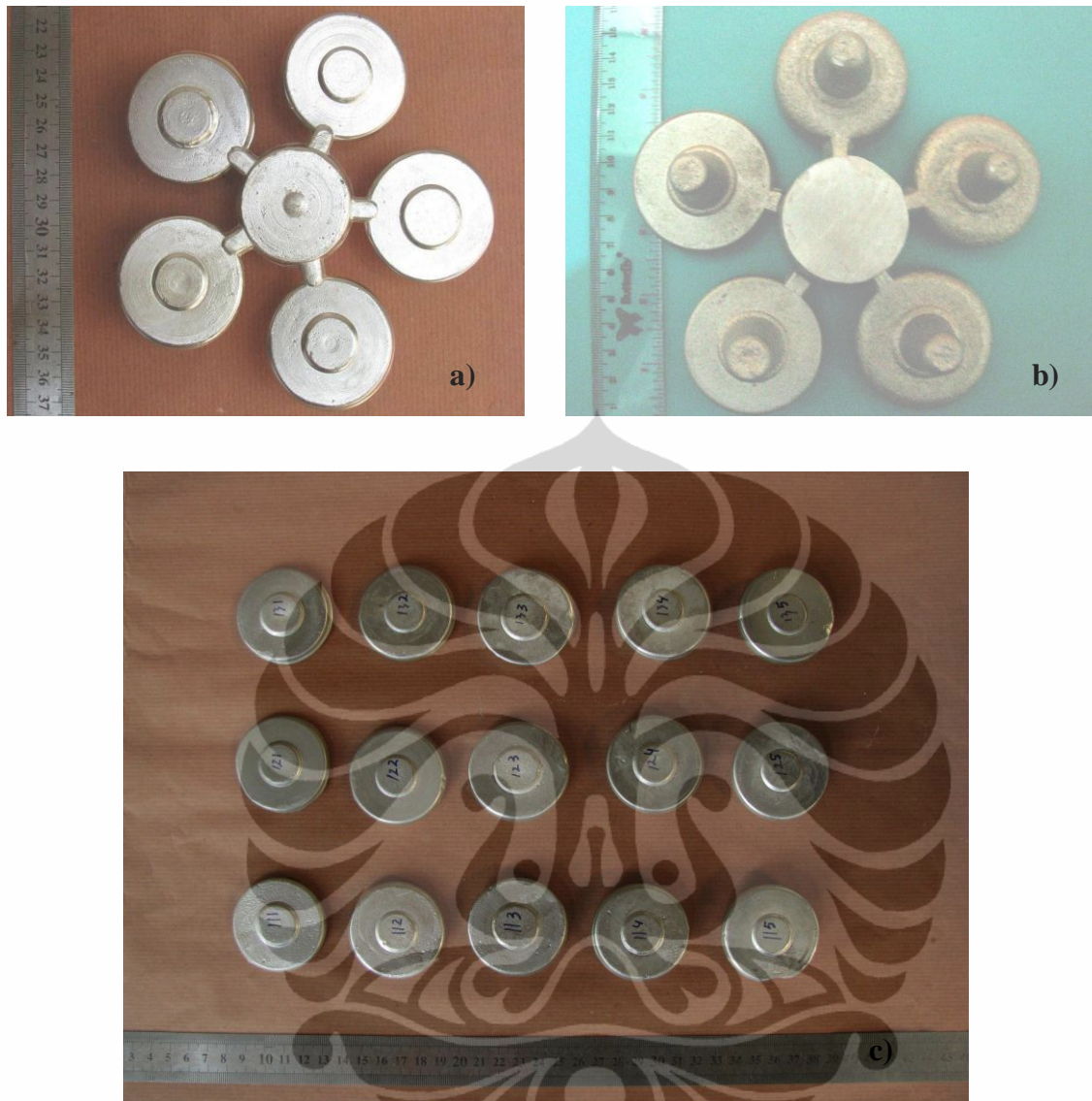
Sub-kegiatan 4.3., Pengecoran spesimen porositas duralumin PSV dilakukan dengan melebur ingot duralumin dalam mangkok *stainless-steel* yang dipasivasi (larutan asam sulfat) dalam tungku PSV. Proses *remelting* duralumin ingot dalam tungku peleburan vakum dilakukan dengan kontrol tekanan (p_1) dan temperatur (T_1). Proses pevakuman yaitu penurunan tekanan (p_1) dilakukan setelah temperatur ruang peleburan 600 °C. Dalam penelitian ini digunakan manometer tekanan vakum, dan kontrol temperatur dilakukan dengan *thermocouple* tipe K yang dilengkapi *thermo-regulator* dan *thermo-monitor*. Setelah duralumin

melebur dilanjutkan dengan penuangan kedalam cetakan vakum (p_2 , T_2). Pada waktu penuangan kondisi p_2 dirancang $0,131 \text{ kg/cm}^2$ lebih kecil dari kondisi p_1 (untuk menjamin terjadi aliran bertekanan dari ruang peleburan ke ruang solidifikasi). Apabila p_2 dirancang $0,131 \text{ kg/cm}^2$ lebih kecil dari kondisi p_1 , maka aliran logam cair masuk kedalam *cavity* cetakan seperti pada proses *die-casting (isostatic pressure)* lihat Gambar 3.2. Dan selama proses solidifikasi berlangsung kondisi p_2, T_2 dibuat konstan. Dalam penelitian ini parameter kevakuman tungku peleburan (1, 0,658, dan $0,526 \text{ kg/cm}^2$), ruang penuangan tekanannya $0,131 \text{ kg/cm}^2$ dibawah tekanan ruang peleburan (sebagai variabel bebas). Sebagai parameter kontrol dalam eksperimen ini adalah suhu *pouring* $700 \text{ }^\circ\text{C}$, tinggi penuangan (9 cm), dan temperatur cetakan ($300 \text{ }^\circ\text{C}$). Dan sebagai variabel terikatnya adalah densitas massa (MB, HIP, Coran), porositas coran (MB, HIP), morfologi porositas (SEM), dan senyawa duralumin (XRD).

Cetakan yang digunakan dan hasil pengecoran spesimen dalam penelitian ini masing-masing dapat dilihat pada Gambar 3.6. dan Gambar 3.7.



Gambar 3.6. Cetakan spesimen
a). Gambar kerja, b). Cetakan utuh, c). Cetakan dibuka



Gambar 3.7. Spesimen duralumin cor
 a). Tampak bawah, b). Tampak atas, c). Produk cor

Sub-kegiatan 4.4., preparasi spesimen (dipotong, digerenda, diampelas, dipolish, dan dietza), pengujian porositas dan metalografi. Selanjutnya hasil pengamatan dan hasil perhitungan dalam penelitian ini dibandingkan dalam bentuk statistik seperti, grafik dan korelasi variabel terikat dan variabel bebas dalam bentuk rumusan matematis.

Kegiatan ke-lima (Penelitian 3), penelitian ini dibagi dalam 3 sub-kegiatan terdiri dari; 1). Simulasi komputer (Z-Cast), 2). pengecoran (*remelt*)

duralumin dalam tungku vakum, dan 3). pengujian metalografi hasil pengecoran tungku vakum. Masing-masing sub kegiatan tersebut dijelaskan sebagai berikut :

Sub-kegiatan 5.1., yaitu memodelkan proses pengecoran duralumin dengan bantuan komputer (Z-Cast) untuk memprediksi jenis porositas (*shrinkage*, gas hidrogen) yang terjadi dalam coran duralumin. Dalam pemodelan ini memperhitungkan sifat-sifat termodinamika dan hidrodinamik material duralumin.

Sub-kegiatan 5.2., yaitu melakukan proses pengecoran spesimen seperti pada penelitian 2 (sub-kegiatan 3). Tetapi dalam penelitian ini parameter kevakuman tungku peleburan diubah pada tekanan yang lebih rendah (0,789, 0,395, dan 0,263 kg/cm²), ruang penuangan tekanannya 0,131 kg/cm² dibawah tekanan ruang peleburan (sebagai variabel bebas). Sebagai parameter kontrol dalam eksperimen ini adalah suhu *pouring* 700 °C, tinggi penuangan (9 cm), dan temperatur cetakan (300 °C). Dan sebagai variabel terikatnya adalah densitas massa (MB, HIP, Coran), porositas coran (MB, HIP), morfologi porositas (OM dan SEM), dan senyawa duralumin (XRD).

Sub-kegiatan 5.3., lakukan persiapan dan pengujian porositas dan metalografi seperti dalam penelitian 2 tetapi dalam penelitian 3 ditambah dengan pengujian OM. Selanjutnya hasil pengamatan dan hasil simulasi Z-Cast dibandingkan. Beberapa parameter proses khususnya untuk duralumin (%Cu, % volume penyusutan masih dalam bilangan bulat) belum didefinisi (deklarasi) dalam *software* Z-Cast sehingga penggunaan *software* ini masih sangat terbatas penggunaannya.

Untuk lebih jelasnya hubungan variabel bebas dan terikat dalam penelitian disertasi dengan judul : Porositas Gas pada Material Duralumin dalam Sistem Pengecoran Vakum, dapat dilihat dalam Tabel 3.1. Dan diagram alir penelitian tersebut dapat dilihat Gambar 3.7.

Tabel 3.1. Data penelitian disertasi

Parameter Proses		Hasil								
Tek. Melt [cmHg]	Persentase Cu [%]	Densitas Massa [g/cm ³]			Porositas [%]			Metalografi		
		Cor	MB	HIP	MB	HIP	Image	SEM	XRD	Optik
76	0									
	2,5									
	3,0									
	3,5									
	4,0									
	4,5									
50	0									
	2,5									
	3,0									
	3,5									
	4,0									
	4,5									
40	0									
	2,5									
	3,0									
	3,5									
	4,0									
	4,5									

3.2. Prosedur Pengecoran dan Pengujian

Salah satu cara untuk mendapatkan kualitas pengecoran duralumin (ingot dan produk cor) yang ajeg dan menjaga keselamatan peralatan dipergunakan diperlukan urutan proses baku yang harus dilakukan secara konsisten. Hasil pengujian dengan pengukuran yang akurat dan presisi diperoleh apabila pengoperasiannya sesuai dengan prosedur peralatan tersebut.. Prosedur pengecoran dan prosedur operasi alat/mesin pengujian yang dilakukan dalam penelitian disertasi terdiri dari;

1. Pengecoran Ingot Duralumin

- a. Memilih dan menggunakan mangkok tembikar yang kering dan tidak retak.
- b. Menimbang; 1458,75g ingot aluminium dan 41,25g pipa tembaga untuk Al-2.5Cu, 1449,45g ingot aluminium dan 50,55g pipa tembaga untuk Al-3.0Cu, 1440g ingot aluminium dan 60g pipa tembaga untuk Al-3.5Cu, 1429,65g ingot aluminium dan 70,35g pipa tembaga untuk Al-4.0Cu, 1420,65g ingot aluminium dan 79,35g pipa tembaga untuk Al-4.5Cu. Letakan hasil penimbangan kedua bahan tersebut kedalam mangkok.
- c. Memasukan mangkok tembikar kedalam tungku reverberatory, menyalakan barner dan mengatur lidah api sampai berwarna biru.
- d. Menutup lubang masuk bahan (mangkok) dan pertahankan api tetap menyela dengan warna biru.
- e. Setelah bahan aluminium dalam mangkok mencair, mengaduk aluminium cair setiap 20 menit sampai seluruh bahan tembaga mencair.
- f. Membuka lubang masuk bahan dan mengeluarkan mangkok dari tungku, membiarkan mangkok tersebut diluar tungku selama 2 menit.
- g. Menuangkan duralumin melt kedalam cetakan ingot dan *casting product* yang telah dipersiapkan, setelah aluminium membeku keluarkan ingot duralumin dan *casting product* dari cetakan.
- h. Memotong ingot duralumin dengan mesin bubut menjadi spesimen uji OES (tebal ± 15 mm) dan potong *casting product* dari *runner* dan *riser*.

2. Pengecoran Spesimen

- a. Menimbang dan memasukan ± 550 g ingot duralumin kedalam mangkok peleburan (*stainless steel* yang dipasivasi). Ingot duralumin tersebut berbentuk tirus dengan diameter dasar 6,5cm, diameter atas 6cm, tinggi 5cm.
- b. Menutup lubang masuk bahan baku, lubang *tapping*, dan katup udara. Mengoperasikan tungku PSV dengan mengarahkan *switch* listrik ke posisi ON sehingga elemen pemanas bekerja dan selongsong keramik menjadi panas (no.1), *setting* suhu ruang peleburan pada 600 °C.
- c. Setelah suhu ruang peleburan mencapai 600 °C mengatur suhu *melting* pada 700 °C (Seperti yang dirancang), mengoperasikan pompa air (no.13), membuka katup udara (no.9) sehingga udara dalam ruang peleburan menjadi vakum dan manometer peleburan (no.8) menunjukkan tekanan (0,789; 0,658; 0,526; 0,395; 0,263) kg/cm² sesuai parameter proses yang dipilih. Setelah temperatur yang diinginkan tercapai lakukan penahanan (*holding*) 15 menit.
- d. Mengontrol cetakan spesimen dalam ruang solidifikasi sehingga *gating system* cetakan tersebut tepat berada dibawah mangkok peleburan dengan jarak 4 cm dibawah lubang *tapping*.
- e. Menutup rapat-rapat lubang keluar-masuk cetakan spesimen (no.10), operasikan elemen pemanas listrik solidifikasi (no.12) dan *setting* temperaturnya pada 300 °C. Menjalankan sistem vakum sehingga tekanan ruang solidifikasi menjadi 0,131 kg/cm² dibawah ruang peleburan.
- f. Melakukan proses *tapping* (*pouring*) dengan memutar roda-gigi pada tuas penutup lubang *tapping* sehingga penutup terangkat dan paduan aluminium melt mengalir kedalam cetakan spesimen.
- g. Memastikan cetakan spesimen terisi dengan paduan aluminium *melt*, memutar balik roda-gigi tuas penutup sehingga lubang *tapping* tertutup rapat.
- h. Membiarkan selama 5 menit sampai duralumin *melt* membeku dalam cetakan.

- i. Menutup saluran pipa vakum, masukan udara atmosfer dan buka lubang keluar-masuk cetakan.
- j. Memasukan dan *setting* cetakan berikutnya dalam ruang solidifikasi dan lakukan urutan operasi mulai dari no 4 sampai no 9.
- k. Mengeluarkan spesimen dari cetakan, memeriksa dan memilih spesimen untuk pengujian berikutnya.
- l. Apabila proses pengecoran sudah selesai, mengarahkan *stop valve* (no.9) ke posisi tutup, mematikan pompa air (no.13), dan mengarahkan *switch* listrik (no.1) ke posisi *OFF*.

3. Pengujian Porositas

- a. Menimbang berat master dengan timbangan elektrik, sebagai berat awal (W_s).
- b. Merangkai instalasi picnometer dan timbang berat keranjang dalam media air (W_k) terbaca berat akhir master (W_{f1}). Secara analitis dirumuskan;

$$W_k = W_s - W_{f1} \quad (3.1)$$

- c. Menimbang berat spesimen diudara (W_a).
- d. Menimbang berat spesimen dan berat keranjang dalam air (W_{wk}) terbaca berat akhir master (W_{f2}). Secara analitis dirumuskan; $W_{wk} = W_s - W_{f2}$
- e. Menghitung berat jenis spesimen (γ_{sp}) dengan pers. 2.7. seperti dalam penelitian Kang [21], yaitu;

$$\gamma_{sp} = \frac{W_a}{W_a - (W_{wk} - W_k)} \times \gamma_w \quad (3.2)$$

- f. Menghitung porositas spesimen (P_r) dengan persamaan (2.6.) seperti yang tertulis dalam Sub-BAB 2.6. yaitu;

$$P = \frac{\gamma_{Tdural} - \gamma_{sp}}{\gamma_{Tdural}} \times 100\% \quad (3.3)$$

4. Uji SEM dan EDS

a. Persiapan

1. Meletakkan sampel pada holder didalam chamber, tutup pintu chamber dan pilih menu pump pada monitor.
2. Melakukan proses *vacuuming* pada *chamber*.

b. Secondary Electron Mode

1. Memilih menu detector dan pilih SE1.
2. Memilih menu edit, kemudian menu status. Melakukan pengisian pada tampilan status dengan isian sebagai berikut :
 - *Brightness* : 40%
 - *Collector bias* : 400 kV
 - *Contras* : 30%
 - *EHT (M)* : 12 kV
3. Memilih menu *beam* dan pilih *optibeam* setup, lakukan aktivasi pada *optibeam on* dan *optibeam mode depth*.
4. Menyalakan *beam on* setelah kondisi vakum tercapai pada *chamber*, ditandai dengan tampilan *ready*.
5. Memutar sampel didalam *chamber* dengan memutar sumbu X, Y dan R sehingga posisi sampel yang diinginkan terlihat pada gambar.
6. Menekan tombol petir pada menu bar, untuk mengubah arus pada *probe* (atur agar tegangan dibawah 100 pV).
7. Menekan tombol *brighthness* dan *contras*, atur sehingga diperoleh gambar dengan kualitas pencahayaan yang baik. *Mouse* sebelah kanan untuk mengatur *brighthness*, sedangkan *Mouse* bagian tengah untuk *contrasnya*.
8. Setelah gambar fokus dan pembesaran yang diinginkan sudah diperoleh, melakukan *scanning* hingga mencapai *rate 512*. Kecepatan *scanning* diatur dengan menekan tombol *fast forward* dan *rewind* pada menu *bar*.
9. Menekan tombol *freezee*.
10. Melakukan *print* hasil dengan menekan tombol ikon foto pada menu *bar*.
11. Menyimpan foto dengan menekan ikon disket pada menu *bar*.

5. Uji OES

- Memilih program Was lab. Pada *shorcut* yang ada pada layar monitor komputer.
- Memilih menu analisis, pilih sesuai jenis bahan/material yang akan diuji.
- Memilih pengujian dengan kode OO (orientasi) jika tidak diketahui *range* komposisinya.

- Melakukan *argon flush* (terdapat pada menu mode) jika mesin baru dinyalakan pertama kali, selama kurang lebih 3 menit.
- Melakukan kalibrasi dengan meletakkan blok standar pada dudukan sampel.
- Menekan tombol start, atau tombol hijau pada mesin.
- Mengulang pengujian beberapa kali sehingga diperoleh jejak *spark* yang cukup baik.
- Membersihkan elektroda dengan sikat untuk menghilangkan kotoran yang melekat.
- Memastikan hasil uji memenuhi spesifikasi blok standar, lakukan kalibrasi jika hasil menyimpang.
- Jika hasil sesuai dengan spesifikasi, melanjutkan dengan meletakkan sampel yang akan diuji.
- Memastikan bahwa permukaan sampel rata atau tidak terdapat rongga udara.
- Menekan tombol *New*, isi dengan identifikasi sampel.
- Menekan kembali tombol *start*, melakukan pengujian sekurang-kurangnya 2 kali.
- Mencetak hasil uji dan paraf lembar *print out* mesin.

6. Uji XRD

- a. Menyalakan komputer dan memilih aplikasi program APD pada komputer.
 - Memilih menu *system preparation* dan menekan *enter*.
 - Memilih menu *edit* dan menekan *enter*.
 - Memilih menu *data collection* dan menekan *enter*.
 - Mengidentifikasi pengukuran dan menekan *enter*.
 - Mengisi identifikasi spesimen, mengisi nama spesimen dan menekan *enter*.
- b. Memasang spesimen pada *holder* yang terletak pada meja datar.
- c. Mengatur sumber X-ray (S) fokus dan membentuk sinar divergen terhadap specimen.
- d. Mengatur sinar difraksi spesimen fokus dan membentuk sinar konvergen pada penghitung sinar (G).

- e. Mengatur posisi S dan G membentuk sudut 2θ .
- f. Menentukan sudut lintasan putar S dan G ($20^\circ - 90^\circ$)
- g. Mengatur kecepatan putar specimen dan S-G.
- h. Menjalankan sistem komputer pada *diffractometer*.
- i. Menekan tombol ON untuk menjalankan sistem *diffractometer*.
- j. Menekan tombol OFF setelah S dan G berputar 2 ($20^\circ - 90^\circ$).
- k. Menyimpan data difraksi pada komputer.
- l. Memindah data difraksi dalam bentuk grafik (intensitas versus sudut 2θ) dan bilangan.
- m. Mencocokkan (*matching*) data difraksi specimen dengan bentuk PDFS (*powder diffraction file standards*).

7. Uji Butir Struktur Dendrit

- a) Preparasi specimen (memotong, menggosok dengan kertas gosok, menggosok dengan kain fanel).
- b) Membersihkan specimen dengan alkohol, dan mencelupkannya dalam larutan etza 15 detik, mencuci dengan air dan mengeringkannya.
- c) Mengobservasi (*mapping*) specimen dibawah mikroskop optik dengan pembesaran 100x dan 450x.
- d) Mendokumentasikan (foto mikroskope) hasil observasi.
- e) Menentukan luas bagian empat persegi panjang (4PP) foto mikroskope dan menghitung jumlah butir utuh (X) dalam 4PP dan jumlah butir terpotong oleh garis keliling 4PP.
- f) Masuk data kedalam persamaan *planimetry* (Jeffry) seperti pers. 3.4a.

$$d = \frac{1}{M} \sqrt{\frac{Z}{n}} \quad (3.4a)$$

yang mana, d : diameter butir, M : pembesaran foto mikro, Z : luas bidang amatan, dan n : jumlah butir yang dihitung dengan persamaan 3.4b.

$$n = X + \frac{Y}{2} \quad (3.4b)$$

3.3. Peralatan Pengecoran dan Penelitian

1. Manometer vakum untuk melihat tekanan dan perubahan tekanan ruang peleburan dan ruang penuangan selama proses pengecoran. Type; Merk: FTB. SIZE: 60 mm, Range: -76 cmHg – 0, Case type: LM, Connection: ¼” PT ISO 9002 Certified.
2. Unit *thermocouple* (terdiri dari *thermocouple*, *thermo regulator*, dan *thermo monitor*) untuk memonitor energi panas peleburan yang masuk kedalam ruang peleburan dan ruang penuangan dengan cara melihat temperaturnya. Thermocouple; Type: K.L: 150, DIA : 8, Class: 0.75, max temp.: 1000 °C. DATE: 902, Merk: YAMASARI . Thermo monitor; Model: T4WI-N3NKCC. Sensor: K(CA). Range: 0-1200 deg Celcius. Power: 110/220VAC. Merk: Autonics. Made in: Korea.
3. Cetakan permanen dari baja *carbon* sedang digunakan untuk pembuatan *test piece* coran. Dari *test piece*, fluiditas logam yang dituang dapat diketahui.
4. Timbangan *digital electric* berskala centigram untuk menimbang material yang akan dilebur dan spesimen yang diuji densitasnya. Type; AND EK-3001, max 300g, Made in Japan
5. Gelas ukur digunakan untuk tempat media (aquades) melihat volume aquades yang dipindahkan akibat spesimen (hasil proses HIP) yang dimasukkan.
6. *Optical emission spectrometry* (OES) digunakan untuk mengukur persentase berat (%wt) unsur kimia yang terkandung dalam material padat (*as-cast* dan produk hasil coran paduan aluminium) dengan cara membakar dan menganalisis nyala bahan yang terbakar. Dari %wt unsur kimia tersebut densitas teoritis paduan aluminium dapat dihitung atau diketahui. OES *apparatus* mempunyai spesifikasi :

Electric system; 100-120/220-240V, Power 1250 watt

Sparking

Time 10 – 15 detik, Pressure 50 psi, Argon gas

Specimen Ø 20 – 30 mm

Base Materials : Steel Nickel Copper
 Zinc Aluminum Magnesium
 Plumbum Titanium

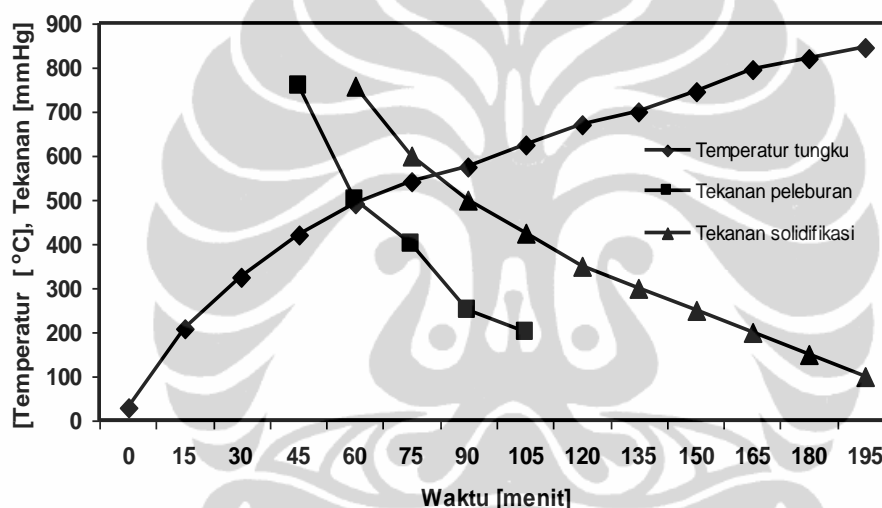
Merk; Foundry Master, Made in Germany

7. Picnometer digunakan untuk mengukur densitas coran duralumin, sehingga % porositas coran paduan aluminium dapat ditentukan atau dihitung (data diskrit).
8. *Optic microscope, scanning electron microscopy, dan x-ray diffraction* untuk melihat ukuran butir, morfologi porositas, dan senyawa dalam produk coran. Spesifikasi apparatus mikroskop dan XRD sebagai berikut :
 - OM : Magnification; 50x, 100x, 200x, 500x, dan 1000x
 Model BX41RF-LED
 100-120/220-240V~, 0.12/0.08A 50/60Hz
 Merk; Olympus, Made in Japan
 - SEM : Magnification; 20.000 - 60.000
 Vacuum Chamber 10^{-5} to 10^{-6} Torr level 2 (to specimen)
 Vacuuming time 5 - 30 minute
 Monitor : View-Sonic 24 inch
 - XRD : Diffractometer type : PW3710 Based
 Filament current if must be limited 3.5A
 Swith on the HT at 15kV-5m.A
 Tube Anode : Cobalt
 Wave length Alpha1 [Å] : 1.78896
 Wave length Alpha2 [Å] : 1.79285
 Start angle [20°] : 20.010
 End angle [20°] : 89.970
 Time per step [s] : 0.500
 Merk; Philips, Made in Holand

BAB IV DATA DAN PEMBAHASAN

4.2. Rancang Bangun Tungku Pengecoran Sistem Vakum

Hasil uji karakterisasi tungku pengecoran sistem vakum (PSV) dapat dilihat pada Gambar 4.1. Indikator pencapaian unjuk kerja tungku PSV terdiri dari monitor temperatur tinggi dan monitor tekanan vakum masing-masing menggunakan *thermocouple* dan *manometer* vakum. Kenaikan temperatur dan tingkat kevakuman pada saat uji unjuk kerja dapat dilihat dalam Lampiran 1.



Gambar 4.1. Karakteristik tungku PSV

Temperatur tungku PSV bertambah secara kontinyu dan kenaikan gradien temperatur diukur setiap periode waktu operasi 15menit. Tingkat kenaikan temperatur tersebut dinyatakan dengan $\Delta T/\text{satuan waktu}$. Dalam penelitian ini laju kenaikan temperatur dikelompokkan atas 3 jenis yaitu; awal operasi sampai menit ke 75, menit ke 75 sampai menit ke 135, menit ke 135 sampai menit ke 195 masing-masing mempunyai laju pemanasan $8,95^\circ\text{C}/\text{menit}$, $5,93^\circ\text{C}/\text{menit}$, $4,73^\circ\text{C}/\text{menit}$. Awal operasi 0menit sampai 75menit mempunyai laju pemanasan tinggi karena panas tersebut masih terisolasi oleh dinding selongsong keramik. Tetapi setelah tungku beroperasi sekitar 75 menit panasnya mulai menembus selongsong keramik tersebut menyebabkan laju pemanasannya berkurang karena

terjadi perpindahan panas dari elemen pemanas ke bodi tungku (konduksi), panas terbawa aliran vakum (konveksi), dan pelepasan panas dari bodi ke udara sekeliling (radiasi). Kondisi tersebut menunjukkan semakin tinggi temperatur tungku maka panas yang hilang atau diserap oleh lingkungannya bertambah besar seperti yang ditunjukkan oleh panas sensible yaitu panas yang hilang berbanding langsung dengan perbedaan suhunya (ΔT). Hilangnya energi panas tersebut seperti efek tarikan cerobong yang memberikan pengaruh negatif pada aliran gas panas keluar dari dalam tungku peleburan konvensional sehingga panas yang ada dalam tungku ikut keluar. Untuk meningkatkan unjuk kerja tungku PSV, pengaruh negatif tersebut harus dicegah memasang *glass wall* dan pintu keluar masuk cetakan, gasket, harus diperiksa untuk kemungkinan kebocoran udara dari luar tungku PSV tersebut. Upaya meminimalis kebocoran tersebut selain untuk menghemat energi, dapat juga membantu menjaga keseragaman suhu dalam tungku PSV.

Selain suhu, kinematika penurunan tekanan pengecoran dari tekanan atmosfer ke tekanan kerja (vakum) dalam tungku PSV tidak jauh berbeda dengan kenaikan suhu seperti dalam Gambar 4.1. Bedanya, kenaikan suhu seiring dengan lamanya operasi tungku PSV dan sebaliknya penurunan tekanan seiring dengan lamanya waktu operasi tungku tersebut. Yang mana, pada awal pevakuman laju penurunan tekanannya tinggi dan semakin rendah tekanan dalam tungku PSV tersebut laju penurunan tekanannya semakin berkurang. Kondisi semacam ini terjadi karena kemampuan pevakuman dari sistem konstan tetapi hambatan saluran dalam tungku PSV meningkat. Untuk mempersingkat waktu dan kestabilan laju pevakuman tungku PSV dilengkapi dengan tangki reservoir vakum. Kelebihan pengecoran duralumin dengan tungku PSV dapat mengurangi porositas pada bentuk-bentuk coran yang kompleks dan tebal pada blok silinder, sirip-sirip pendingin seperti pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2. Cacat porositas pada produk cor [57]

4.2. Simulasi Cetakan Permanen (Z-Cast)

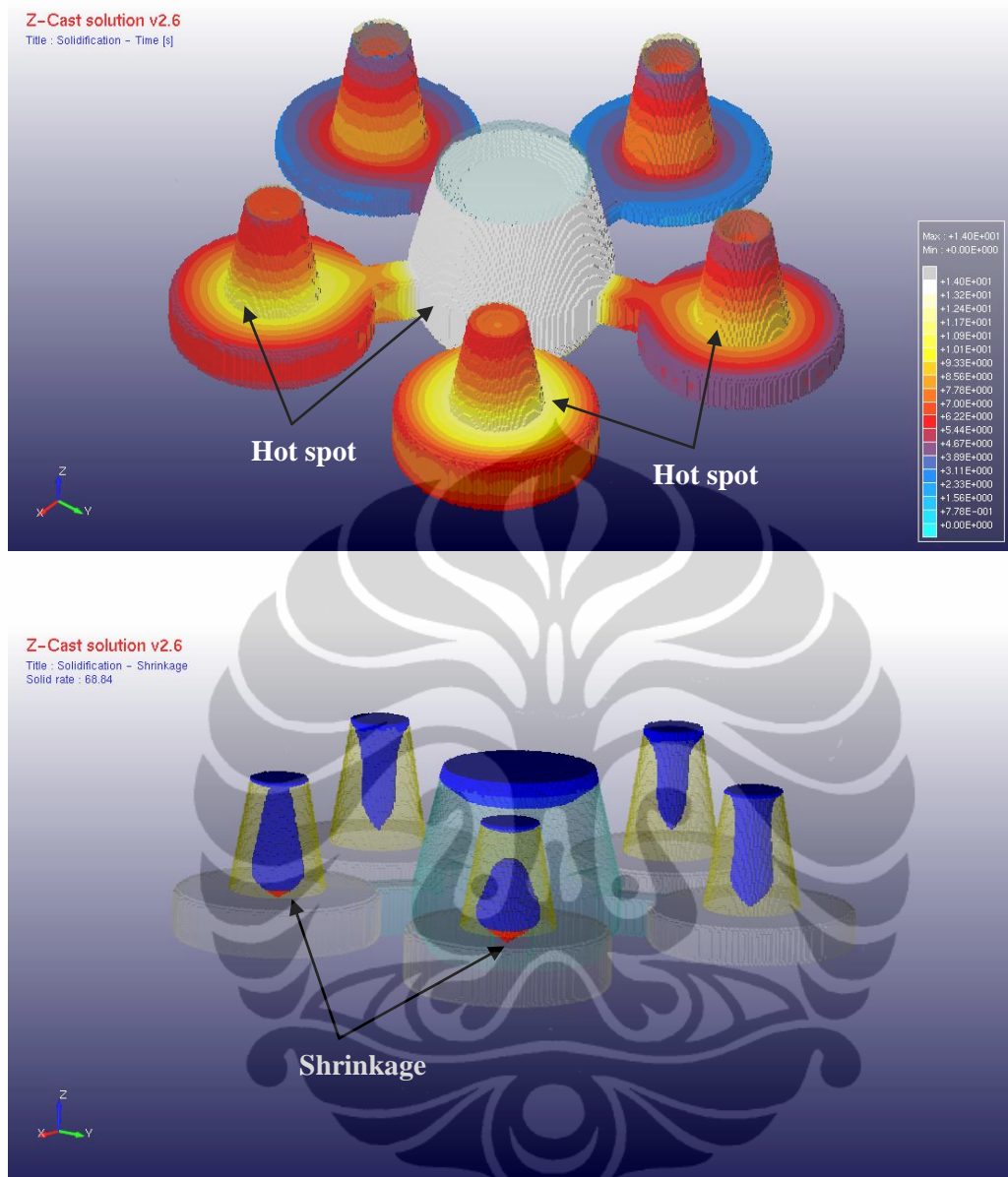
Software Z-Cast merupakan simulasi komputer untuk mengobservasi mekanisme pembentukan dan memprediksi cacat penyusutan (*shrinkage*) yang terjadi dalam pengecoran paduan aluminium. Berdasarkan teori *shrinkage* didefinisikan sebagai rongga yang terjadi pada daerah membekuan terakhir karena adanya penyusutan dapat direkonstruksi dengan *Software Z-Cast* ini. Prediksi *shrinkage* tersebut didasarkan pada parameter-parameter termal logam seperti; temperatur dan waktu penuangan, temperatur dan bahan cetakan, unsur paduan, kecepatan pengisian, volume penyusutan, dan waktu atau laju pembekuan. Parameter tersebut dideklarasikan sebagai masukan data dalam *software Z-Cast* untuk menghasilkan simulasi yang mendekati kondisi pengecoran aktual. Dengan demikian *software Z-Cast* mampu menampilkan prosedur pengisian logam cair yang dianalisis dengan aliran, juga menampilkan daerah yang belum terisi. *Z-Cast* dapat menampilkan medan temperatur pengecoran dan cetakan selama pengisian yang disebut kecepatan *tracking* pada layar. Tetapi isi dari parameter yang dideklarasikan tersebut masih kurang lengkap contoh, menu bahan yang tersedia dalam *software Z-Cast* masih terbatas untuk paduan yang sering digunakan dalam pengecoran paduan aluminium dan penyusutan yang terjadi dibagian dalam produk cor. Tujuan dari simulasi komputer (*Z-Cast*) pengecoran untuk validasi

shrinkage pada rancangan cetakan permanen. Berikut ini adalah hasil simulasi Z-cast dari desain *gating system* yang dibuat dengan masukan data;

<i>Pouring time</i>	: 30 second
<i>Shrinkage</i>	: 8 %
Cu	: 2,5 – 4,5%
Al	: 97,5 – 95,5%
<i>Mold temperature</i>	: 300
<i>Pouring</i>	: 700
<i>Mold material</i>	: low carbon steel
<i>Mold depth</i>	: 6 cm (<i>cope</i> ; 3 cm and <i>drag</i> ; 3 cm)

4.2.1. Pengaruh Parameter Proses Pengecoran terhadap Hasil Simulasi

Dalam penelitian ini digunakan cetakan permanen yang terdiri dari susunan dua batang blok silindris (*cope* dan *drag*) dari baja carbon rendah. Kedua bagian tersebut apabila dipasangkan akan membentuk rongga sebagai produk coran. Dalam simulasi Z-Cast ini data pengecoran dilakukan pada kondisi atmosfer ($1\text{kg/cm}^2 \approx 76\text{cmHg}$) dan simulasi Z-Cast ini untuk memastikan dalam produk cor (spesimen) tidak terjadi porositas karena penyusutan. Selanjutnya, logam cair mengisi rongga cetakan tersebut melalui *gates*, *sprues* dan *runner*, *risers* ditambahkan untuk menjamin pengisian waktu terjadi pembekuan dan penyusutan. Pada cetakan tersebut rongga coran dihubungkan dengan udara luar (ventilasi) untuk mengalirkan udara dalam cetakan untuk keluar. *Gating system* mengisi logam cair dengan cepat ke seluruh bagian-bagian coran dan turbulensi harus minimal yang dilakukan dengan memperhalus permukaan rongga cetakan sehingga kualitas produknya terjamin. Dari penentuan masukan data pengecoran akan tampil; *mesh* (bentuk), *flow* (aliran dan pengisian), *flow temperature* (sebaran suhu selama analisis aliran), *Solidification Temperature* (sebaran suhu pembekuan), *Solidification Time* (sebaran waktu pembekuan), *Solidification Niyama* (nilai pembekuan Niyama), dan *Cyclic casting Time* (siklus sebaran waktu pembekuan die casting) sehingga diperoleh hasil simulasi seperti dalam Gambar 4.2.



Gambar 4.3. Simulasi Z-Cast desain produk awal
a). Laju solidifikasi b). *Shrinkage*

Tabel 4.1. Faktor jarak pengisian

Paduan Aluminium	Faktor Jarak Pengisian	Rentang pengisian
Al (99.99 %)	10.0	Pendek
Al Cu 4.5	6.0	Panjang
Al Si 7	6.0	Panjang
Al Si 12	10.0	Pendek
Al Si (6 - 13)	5.0	Panjang

Shrinkage porosity merupakan masalah utama dalam pengecoran paduan aluminium baik coran dengan cetakan pasir maupun cetakan permanen. Dalam

simulasi Z-Cast tersebut, tidak ditemukan porositas dalam produk cor (*wheel*), porositas (noktah merah) hanya terdapat pada dasar *riser* untuk ketebalan cor 12,5 mm dan 15 mm lihat Gambar 4.3b. Menurut Ravi [34], faktor-faktor lain seperti pembentuk celah udara pada *interface* cetakan logam, konveksi dalam logam cair, permukaan pengisian (*feed*), adanya inti, rancangan saluran, lokasi kesemuanya itu berpengaruh pada pembentukan *shrinkage porosity* dan sulit diprediksi secara manual. Dari visualisasi simulasi Z-Cast, porositas tersebut terjadi di akhir solidifikasi hal ini menunjukkan penyebab porositas karena mekanisme penyusutan yang disebut porositas *shrinkage*. Dalam paduan dengan rentang pembekuan pendek (*short freezing time*), khususnya dalam cetakan permanen, *shrinkage* cenderung terkonsentrasi pada *hot spot*. Dan dalam paduan rentang pembekuan panjang, seperti dalam cetakan pasir *shrinkage* yang terjadi terdistribusi diseluruh tuangan, tetapi *shrinkage* tetap terkonsentrasi disekeliling *hot-spot*. Lokasi dan keberadaan *shrinkage porosity* dapat diprediksi pada daerah atau bagian cor temperatur tinggi (*hot spot*) dan gradien temperaturnya kecil (*shoot feeding distance*) lihat Tabel 4.1. Porositas yang terjadi karena kebocoran aliran *feeding* (*shrinkage-related porosity*), volume pori akan meningkat dengan laju pendinginan solidifikasi. Hal ini terjadi karena adanya hubungan kriteria Niyama yang berbasis pada penurunan tekanan liquid memotong daerah *mushy*. Yang mana kedalaman daerah *mushy* dipengaruhi oleh gradien temperatur dan laju pembekuan yang rendah pada masing-masing konsentrasi sehingga meningkatkan *primary dendrite arm spacing* (PDAS), *secondary dendrite arm spacing* (SDAS), dendrite tipe radius. Pengaruh tersebut seperti yang dilaporkan Kaya dkk. [58], untuk menggambarkan pertumbuhan parameter mikrostruktur dalam daerah *mushy*. Pada dasarnya solidifikasi adalah pembentukan mikro selama pembekuan tergantung pada karakteristik paduan dan terutama adalah fungsi dari profil suhu pada antarmuka pembekuan. Ketika sebuah paduan logam mengalami solidifikasi, morfologi padat yang paling sering diamati adalah mikro dendritik. Dalam solidifikasi paduan dendritik, zat terlarut mendistribusikan kembali karena perbedaan kelarutan antara fase cair dan padat. Zat terlarut menolak dari antarmuka padat-cair mengembangkan wilayah dalam cairan di mana suhu aktual lebih rendah dari suhu likuidus dan menyebabkan pendinginan.

Kemampuan panas mengalir di seluruh bagian *casting* dan melalui antarmuka dari *casting* untuk cetakan langsung mempengaruhi evolusi solidifikasi dan memainkan peran penting dalam menentukan kondisi pembekuan dalam pengecoran, terutama pengecoran dengan difusivitas panas yang tinggi seperti *chill casting*. Gravitasi atau *die casting*, pengecoran kontinyu dan *squeeze casting* adalah beberapa proses pengecoran dengan kualitas produk baik yang langsung dipengaruhi oleh perpindahan panas pada antarmuka / logam cetakan. Umumnya *shrinkage porosity* meningkat dengan berkurangnya nilai kriteria Niyama (yaitu dengan bertambahnya laju pendinginan). Tentunya, pengecoran dengan bentuk-bentuk kompleks dan perpindahan panas dari semua permukaan cetakan menjadi tidak merata.

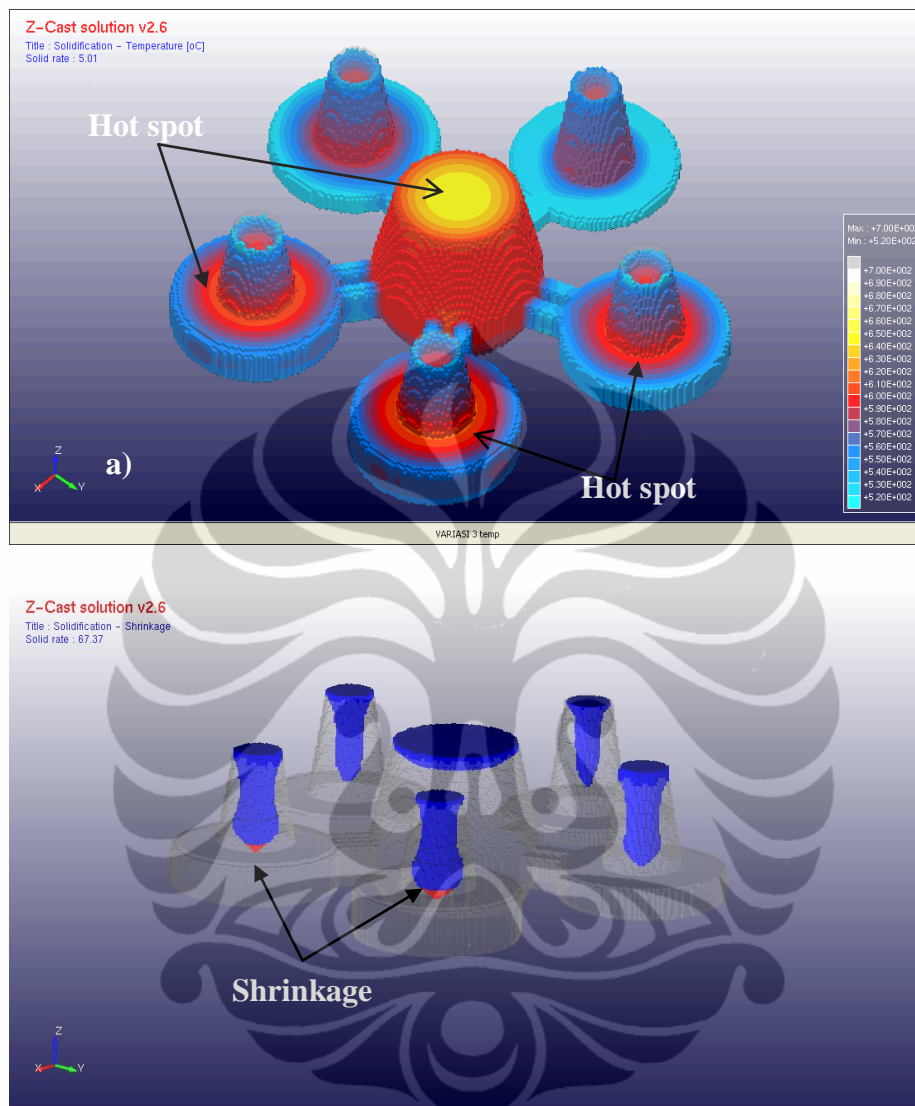
Modulus cor merupakan istilah untuk menggambarkan perbandingan dari volume cor dengan luas permukaan cor, pada setiap bagian dari *casting* tersebut. *Shrinkage porosity* merupakan masalah utama dalam pengecoran paduan aluminium baik coran dengan cetakan pasir maupun cetakan permanen. Menurut aturan Chvorinov, bagian-bagian dari *casting* yang memiliki modulus cor lebih tinggi (volume cor : luas area permukaan) akan membeku paling akhir, sedangkan bagian dengan nilai modulus cor yang rendah akan membeku lebih awal. Idealnya untuk *casting* arah pembekuannya dari produk menuju *riser* atau *feeder*; artinya bahwa *riser* harus terpasang di bagian *casting* yang memiliki nilai modulus tertinggi. Modulus *riser* harus sama atau lebih besar dari *casting* yang terpasang. Secara teoritis hal ini akan mengijinkan kontraksi yang terjadi selama solidifikasi dan diberi isian oleh logam cair dari *riser*, sehingga mencegah penyusutan yang terjadi, seperti digambarkan dalam Gambar 4.3b. Produk cor diperoleh setelah *riser* dan *ingate* dipotong, dari observasi makrokopis tidak ditemukan adanya porositas (gas dan *shrinkage*) pada permukaan cor (lihat Gambar 4.4.). Hal tersebut menunjukkan bahwa desain cetakan permanen memenuhi kriteria yang dipersyaratkan untuk mendapatkan *sound casting* dengan memperhitungkan aliran panas dan aliran logam cair (fluida).

Umumnya dalam proses pengecoran, *feeding system* mempunyai dua fungsi utama; (1) mengisi rongga cetakan dengan metal *melt*, dan (2) tambahan mengisi logam *melt* ke pengecoran untuk mengkompensasi *shrinkage* yang terjadi

selama solidifikasi. *Feeding system* membantu mencegah kerusakan atau cacat pengecoran seperti porositas dan penyusutan rongga oleh lokasi *feeder* pada satu lokasi atau di sekeliling cetakan. *Feeder* biasa disebut *riser* atau *feeder head* yang berfungsi sebagai reservoir logam cair yang secara kontinyu men-*supply* coran dengan logam cair sampai pembekuan menyeluruh. *Feeder* ditempatkan pada daerah *chucky* pengecoran dimaksudkan untuk menambah kebutuhan mengisi logam cair selama solidifikasi. Secara detail *feeder* dalam geometri pengecoran membantu menghilangkan cacat pengecoran.

Umur fluida atau fluiditas logam cair mengacu pada kemampuan paduan *melt* mengisi rongga cetakan, aliran menuju saluran tipis membentuk dinding dan bagian-bagian yang tipis itu sendiri, dan membentuk permukaan yang halus. Selain dipengaruhi temperatur logam *melt*, fluiditas juga tergantung pada faktor-faktor kimia, metalurgi, dan tegangan permukaan. Oleh karena itu fluiditas masing-masing paduan berbeda. Contoh, aluminium 356 mempunyai fluiditas yang lebih baik dibanding aluminium 206. *Misruns* yang kaitannya dengan cacat pengecoran dapat dicegah secara tepat dengan meningkatkan fluiditas paduan yang digunakan pengecoran. Fluiditas menentukan ketebalan minimum dan panjang maksimum dari bagian coran yang tipis disamping itu fluiditas juga menentukan detail kehalusan produk coran.

2.2.2. Hasil Modifikasi Desain Cetakan



Gambar 4.4. Modifikasi *runner* dalam simulasi Z-Cast
a). Laju solidifikasi b). *Shrinkage*

Waktu solidifikasi yaitu solidifikasi terakhir dengan analisis distribusi waktu solidifikasi menampilkan posisi akhir saat beku dan posisi cacat penyusutan. Fungsi kriteria dari gradien temperatur, laju pendinginan, Niyama (G/\sqrt{R}) secara kuantitatif dapat mengetahui volume penyusutan. Perpindahan panas di daerah cetakan terutama dikendalikan oleh konduksi panas di antarmuka antara permukaan kulit dan cetakan. Untuk menganalisis, setiap bentuk benda harus dibagi ke *mesh* yang kecil. Kesulitan terbesar untuk akurasi pemodelan aliran panas adalah perpindahan panas yang terjadi di celah ini, q_{celah} yang bervariasi dengan waktu dan

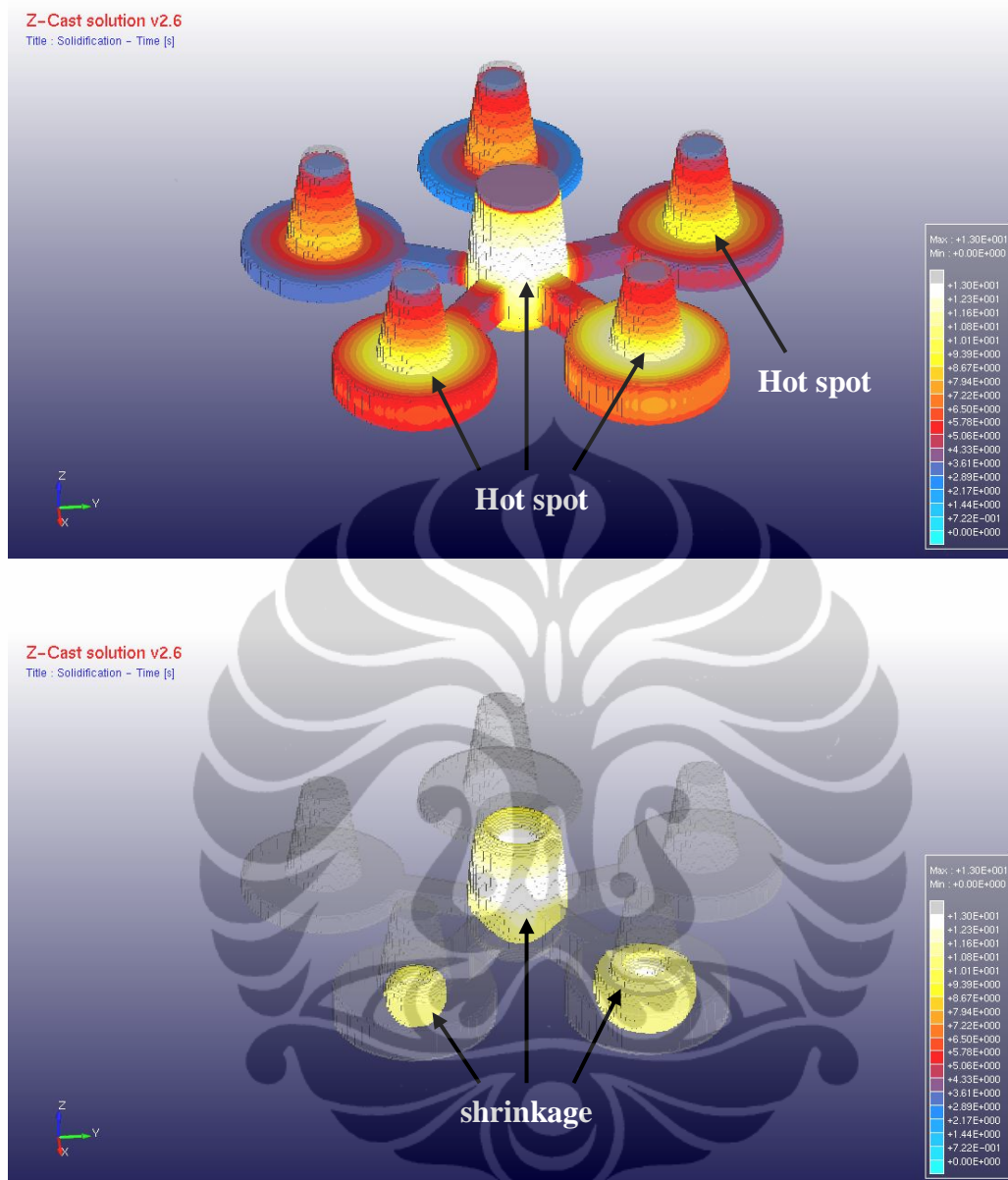
posisinya tergantung pada ketebalan. Berdasarkan hasil simulasi Z-Cast pada desain awal sebagaimana diuraikan sebelumnya yaitu terjadi *shrinkage* (noktah merah) pada produk *casting* dengan tebal 12,5 mm dan 15 mm dan untuk menghilangkan atau meminimalis *shrinkage* tersebut dilakukan modifikasi pada *runner* dan *sprue*. Menurut Gallo [59], kombinasi panas dan tekanan pengecoran dapat mengurangi *shrinkage* dan porositas (H_2). *Shrinkage* hilang karena tekanan dan porositas (H_2) akan masuk kedalam larutan karena panas dan tekanan. Dengan demikian desain modifikasi dapat dilakukan berdasarkan desain awal dengan penambahan *riser* pada bagian yang mengalami *shrinkage*. Desain modifikasi diperlihatkan pada Gambar 4.4. dan Gambar 4.5. berikut ini. Secara teknis modifikasi dilakukan pada bagian;

a. Runner

Memperbesar modulus *runner* yaitu luas penampang *runner* untuk *casting* tebal 12,5mm dan 15mm diperbesar dan dibuat 2 saluran. Modifikasi ini belum menunjukkan hasil yang optimal karena logam *melt* dalam *runner* mengalami solidifikasi lebih dahulu sehingga logam *melt* pada *sprue* tidak mengisi rongga penyusutan pada daerah *hot spot*. Disamping itu, penambahan *runner* mengakibatkan tahanan alir logam *melt* meningkat dan kontak permukaan cetakan bertambah sehingga logam *melt* lebih dulu membeku akibatnya logam cair tidak mengisi rongga penyusutan di daerah *hot spot*.

b. Sprue

Merubah dimensi *sprue* yaitu memperkecil ukuran (diameter) *sprue* dengan maksud memberikan kesempatan logam *melt* dapat mengalir melalui *runner* pada saat *hot spot* mengalami solidifikasi. Upaya ini belum memberikan hasil yang diharapkan karena memperkecil dimensi *sprue* berakibat *runner* semakin panjang sehingga logam mengisi *hot spot* terhalang akibatnya logam cair tidak dapat mengisi rongga penyusutan pada daerah *hot spot*.



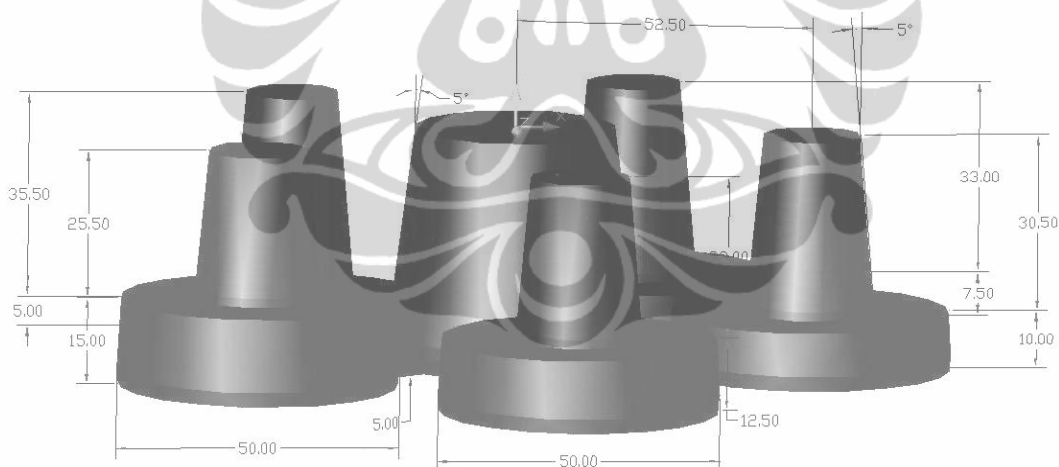
Gambar 4. 5. Modifikasi Diameter *sprue* dikecilkan
a). Laju solidifikasi, b). *Shrinkage* pada *sprue* dan hot spot

Salah satu kunci dalam membuat produk casting yang berkualitas tinggi adalah desain *gating system* yang baik. Terutama jika proses yang digunakan adalah pengecoran gravitasi. Aliran logam yang mengalir menuju cetakan melalui *gating system* merupakan faktor penting dalam mendapatkan desain yang baik. Potensi cacat biasanya terjadi akibat kesalahan desain yang mengakibatkan aliran logam cair tidak optimal. Pada aluminium, pembekuan juga dapat mejadi faktor

penentu besarnya cacat yang timbul. Untuk mendapatkan desain yang baik, umumnya mengikuti beberapa aturan dalam pembuatan *gating system*.

Prinsip dasar dalam pembuatan *gating system* dirumuskan menurut prinsip hidrolis. Aturan-aturan yang berlaku diantaranya: (1) Hukum Bernoulli, (2) Hukum Kontinuitas, (3) Efek Momentum, (4) Gaya friksi/gesek, dan (5) Reynolds Number. Persamaan empiris tersebut dapat digunakan untuk mendesain *gating system* pada sebuah produk pengecoran. Pendekatan melalui eksperimental biasanya dilakukan untuk memperoleh desain yang paling optimal. Namun metode ini membutuhkan waktu dan biaya yang cukup besar. Sehingga saat ini telah banyak produsen *casting* aluminium yang menggunakan simulasi komputer dalam membuat desain *gating system* dengan pertimbangan efisiensi waktu dan biaya.

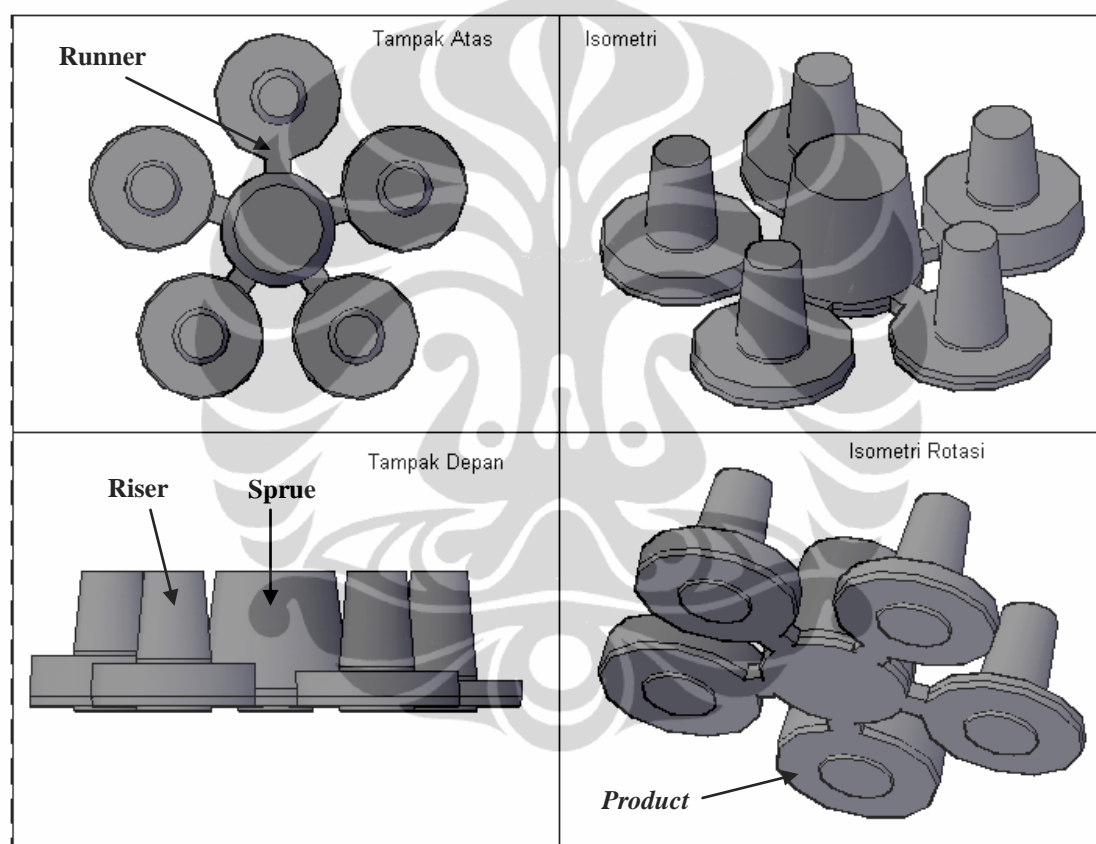
4.2.3. Desain *Gating System*



Gambar 4.6. Geometri *Casting product*

Aliran dalam cetakan sangat menarik untuk diamati karena pengaruh fenomena-fenomena penting yang memberikan konsekuensi pada kualitas produk coran. Pengaruh ini meliputi disipasi *superheat*, jenis aliran dan oksida yang terperangkap di lapisan permukaan, dan inklusi dan gelembung gas yang terperangkap di bawah permukaan dan gas gelembung. Diperlukan kompromi desain yang secara simultan memenuhi persyaratan yang saling bertentangan untuk menghindari mekanisme cacat. Beberapa fenomena penting yang mengatur pengecoran logam dan

menentukan kualitas produk. Pada simulasi Z-Cast, desain *gating system* dibuat untuk produk *casting* duralumin dengan satu kali penuangan terisi logam cair dengan tebal berbeda (5mm, 7,5mm, 10mm, 12,5mm, 15mm). Desain produk *casting* terdiri dari bagian utama yaitu; *sprue*, *runner*, *product*, dan *riser* seperti dalam Gambar 4.6. Dan Gambar 4.7. menunjukkan detail bagian utama yang tampak lebih rinci. Perhitungan *feeding* dalam cetakan disusun berdasarkan prinsip-prinsip dasar sifat-sifat termal dan hidrolis yang kemudian disimulasikan dengan Z-Cast *software* untuk menguji kelayakan desain.



Gambar 4.7. Bentuk produk *casting* dalam aneka pandang

Beberapa parameter yang menjadi pertimbangan dalam perhitungan desain *gating system*, seperti kondisi pengisian, rasio penampang dari masing-masing bagian *gating system*. Pada aluminium, waktu pengisian maksimum adalah 25 detik dengan system *unpressurized* dan hasil perhitungan 13,02 detik. Gambar 4.7. menunjukkan kedudukan desain *gating system* untuk produk *casting*.

4.3. Kuantitas Porositas Duralumin

Tabel 4.2. Unsur minor duralumin

Paduan	Unsur [%berat]					
	Mn	Si	Mg	Zn	Fe	Lain-lain
Al-2.5Cu	0,09	0,35	0,16	0,04	0,57	0,29
Al-3.0Cu	0,1	0,29	0,18	0,07	0,76	0,2
Al-3.5Cu	0,11	0,14	0,01	0,01	0,11	0,12
Al-4.0Cu	0,08	0,51	0,3	0,26	0,34	0,11
Al-4.5Cu	0,07	0,7	0,22	0,27	0,82	0,63

Persentase unsur-unsur minor dalam duralumin Mn, Si, Mg, Zn, Fe, dan yang lain masing-masing paduan berbeda seperti terlihat dalam Tabel 4.2. Perbedaan tersebut kemungkinan disebabkan oleh ketidak homogenan material secara kimiawi, perubahan kuantitas yang disebabkan oleh penambahan tembaga yang berbeda, perubahan atmosfer selama proses pengecoran yang fluktuatif atau oleh reaksi kimia yang berkaitan dengan proses peleburan. Unsur minor tersebut berpengaruh pada sifat duralumin padat-cair, dan pada akhirnya unsur minor akan berpengaruh pada sifat fisik (berat jenis) dan sifat metalografi (porositas, fasa, mikrostruktur). Contoh; unsur Fe dalam duralumin mempercepat pelarutan fasa tembaga mengacu Li [60]. Pengelompokan unsur mikro dalam duralumin hasil uji OES dalam Tabel 4.2. menunjukkan % unsur Si lebih tinggi dari unsur Mn dan Mg, dan % unsur Fe lebih tinggi dari unsur Zn dan unsur mikro yang lain. Seperti disebutkan, Silikon (Si) dapat digunakan untuk meningkatkan karakteristik pengecoran seperti; memperbaiki fluiditas, ketahanan *hot tearing* dan *feeding* (Sub BAB 2.1). Hal itu terjadi karena proses peleburan bahan baku dengan suhu yang tinggi (1200 °C) dan lamanya pembakaran (3-4 jam) mengakibatkan unsur dengan suhu lebur rendah (Mg, Zn, dan unsur lain) menguap akibatnya % unsur Mg dan Zn turun. Mengacu dalam sistem kesetimbangan masa dalam sistem campuran atau paduan, penurunan % unsur akan menyebabkan kenaikan % unsur yang lain. Contoh, unsur suhu lebur tinggi (Fe dan Si) cenderung meningkat. Disamping unsur Fe dan Si, unsur pengotor dalam duralumin relatif lebih tinggi

dari unsur Mn, Mg, dan Zn tetapi lebih rendah dari unsur Si hal ini disebabkan adanya unsur dengan titik lebur tinggi meskipun jumlahnya relatif kecil (Ni, Cr, dan Ti). Secara rinci persentase berat unsur dalam duralumin dapat dilihat pada Tabel 4.3. Apabila hasil uji OES dikelompokkan atas unsur-unsur utama seperti; tembaga, mangan, silikon, magnesium, seng, besi, timah putih dan aluminium sebagai unsur penyeimbang (lihat Tabel 4.2).

Tabel 4.3. Unsur duralumin [56]

Duralumin [%berat Cu]	Persen berat unsur [%]								Berat jenis teoritis [g.cm ⁻³]
	Cu	Mn	Si	Mg	Zn	Fe	Sn	Al	
2.5	2.49	0.09	0.35	0.16	0.04	0.57	0.11	Balance	2.65
3.0	3.00	0.10	0.29	0.18	0.07	0.76	0.10	Balance	2.68
3.5	3.49	0.11	0.14	0.01	0.01	0.11	0.01	Balance	2.72
4.0	3.80	0.08	0.51	0.30	0.26	0.34	0.01	Balance	2.74
4.5	4.49	0.07	0.70	0.22	0.27	1.32	0.013	Balance	2.79

Nilai berat jenis duralumin (γ) teoritis (tanpa porositas) hasil penelitian Tabel 4.3. sama atau sedikit berbeda dengan nilai berat jenis duralumin yang digunakan oleh peneliti lain. Contoh, Suzuki menentukan berat jenis Al-4.5Cu adalah 2.8g/cm³ [13]. Apabila berat jenis Al-4.5Cu hasil eksperimental dibandingkan dengan berat jenis aktual, berat jenis eksperimental 0.01g/cm³ lebih kecil dari berat jenis aktual. Perbedaan berat jenis teoritis penelitian dengan jenis teoritis aktual secara statistik mempunyai kesalahan relatif 0.36% artinya kesalahan relatif tersebut dalam toleransi atau masih dibawah kesalahan relatif standar (5%).

Porositas merupakan salah satu jenis cacat pengecoran yang terjadi akibat hidrogen (udara) terlarut dan terperangkap, dan/atau *feeding* yang kurang. Porositas sering memicu keretakan yang menyebabkan terjadi konsentrasi tegangan dan kebocoran, akhirnya kualitas cor turun atau produk cor harus di daur ulang (*remelt*). Menurut Haizhi [20] porositas dalam material solid tidak dapat menerima beban luar secara terus menerus dan yang lebih berbahaya apabila pori tersebut menyebabkan tegangan terpusat sehingga memicu retak mikro,

selanjutnya retak mikro terus berkembang menjadi patah. Porositas atau kekosongan karena penyusutan dalam paduan aluminium (Al-Cu) cor yang terbentuk diantara dua dendrit saat solidifikasi disebut mikro *shrinkage*. Dan penyusutan yang terjadi diantara dua permukaan secara terpisah karena efek penyusutan saat solidifikasi disebut makro *shrinkage*. Besar atau kecilnya penyusutan kemungkinan dipengaruhi oleh satu atau kombinasi dari; suhu penuangan, persentase tembaga, dan laju solidifikasi. Potensi terjadi porositas pada material duralumin relatif tinggi dibanding paduan aluminium lain karena penyerapan hidrogen yang tinggi, pembentukan segregasi dari pengotor, dan penyusutan yang tinggi (3,3 – 8,8%). Salah satu cara untuk meningkatkan produktivitas pengecoran (*yield casting*) duralumin dilakukan dengan proses *degassing* yaitu pevakuman tekanan rendah pada proses *melting*, *pouring* dan *solidification*.

Duralumin merupakan paduan aluminium dengan mampu tuang atau mampu alir yang rendah tetapi perbandingan kekuatan terhadap berat jenis tinggi, mampu diberi perlakuan panas, mampu dilas, dan tahan impak pada temperatur *cryogenic* lebih tinggi dari paduan aluminium yang lain. Kompleksitas bentuk dan dimensi produk cor sering menyebabkan cacat porositas pada material duralumin. Proses solidifikasi dalam pengecoran logam, khususnya duralumin dengan mampu tuang rendah merupakan proses yang kompleks karena beberapa interaksi yang terjadi serempak seperti; aliran panas, aliran hidrodinamik dan massa. Transformasi *liquid-solid* duralumin *melt* dalam proses pengecoran logam disebut solidifikasi, dan laju solidifikasi tersebut dikontrol oleh laju pendinginan. Laju pendinginan tinggi menyebabkan proses solidifikasinya cepat dan sebaliknya laju pendinginan rendah proses solidifikasinya lambat. Umumnya laju pendinginan dalam pengecoran paduan aluminium digunakan untuk mengontrol pembentukan SDAS. Menurut Dobrzanski [33] laju pendinginan tinggi menghasilkan SDAS kecil (26.6 μm) dan laju pendinginan lambat menghasilkan SDAS besar (79.06 μm). Memprediksi porositas dalam pengecoran duralumin sangat penting sebagai upaya untuk mencegah produk terbuang (*reject*) dan mengurangi biaya produksi. Tetapi untuk mendapatkan tingkat prediksi porositas yang akurat dan presisi diperlukan pendekatan kombinasi deduksi analitis (matematis) dan eksperimen.

Tabel 4.4. Densitas teoritis material bahan baku dan duralumin

Material	Unsur												Densitas Teoritis [g/cm ³]	
	Al	Cu	Mn	Si	Mg	Zn	Fe	Sn	Pb	Ni	Cr	Ti	MB	HIPing
	2.55*	8.38*	7.2	2.52*	1.59*	7.14	7.26*	7.17*	11.02*	8.21*	7.19	4.5		
Ingot Al	99.500	0.006	0.108	0.280	0.008	0.005	0.001	0.010	0.002	0.023	0.029	0.001	2.56	2.98
	2.53725	0.00050	0.00778	0.00706	0.00013	0.00036	7.3E-05	0.00072	0.00022	0.00189	0.00208	0.00004		
Skrap Cu	0.002	98.500	0.003	0.245	0.001	0.280	0.358	0.005	0.005	0.100	0.002	0.000	8.32	-
	0.00005	8.25430	0.00022	0.00617	1.6E-05	0.01999	0.02599	0.00036	0.00055	0.00821	0.00014	0.00000		
Duralumin 0,0% Cu	99.500	0.006	0.108	0.280	0.008	0.005	0.001	0.010	0.002	0.023	0.029	0.001	2.56	2.98
	2.53725	0.00050	0.00778	0.00706	0.00013	0.00036	7.3E-05	0.00072	0.00022	0.00189	0.00208	0.00004		
Duralumin 2,5% Cu	96.050	2.495	0.086	0.346	0.161	0.045	0.572	0.112	0.012	0.005	0.005	0.013	2.73	3.18
	2.44927	0.20908	0.00619	0.00872	0.00257	0.00325	0.04153	0.00803	0.00132	0.00041	0.00036	0.00058		
Duralumin 3,0% Cu	95.400	3.000	0.098	0.290	0.179	0.073	0.758	0.105	0.008	0.005	0.012	0.010	2.77	3.11
	2.43270	0.25140	0.00706	0.00731	0.00285	0.00521	0.05503	0.00753	0.00088	0.00041	0.00090	0.00045		
Duralumin 3,5% Cu	96.000	3.490	0.106	0.145	0.0096	0.013	0.108	0.010	0.002	0.005	0.001	0.005	2.76	3.33
	2.44800	0.29246	0.00763	0.00365	0.00015	0.00095	0.00784	0.00072	0.00022	0.00041	7.2E-05	0.00024		
Duralumin 4,0% Cu	94.600	3.800	0.0756	0.508	0.304	0.260	0.345	0.010	0.026	0.005	0.001	0.013	2.80	3.43
	2.41230	0.31844	0.00544	0.01280	0.00483	0.01856	0.02505	0.00072	0.00284	0.00041	7.2E-05	0.00057		
Duralumin 4,5% Cu	92.800	4.490	0.072	0.696	0.222	0.268	1.320	0.013	0.032	0.005	0.001	0.017	2.89	3.49
	2.36640	0.37626	0.00521	0.01754	0.00353	0.01913	0.09583	0.00090	0.00353	0.00041	7.2E-05	0.00078		

Keterangan : Angka-angka merah, biru, dan hitam masing-masing menunjukkan densitas teoritis unsur, persentase unsur hasil uji OES, dan densitas unsur dalam material duralumin(parsial).

Referen; 1). Bilangan merah [61]

2). *Bold numbers* * [62]

3). Hasil eksperimen (bilangan biru, hitam, dan hijau)

4.3.1. Pengaruh Parameter Proses Pengecoran terhadap Berat Jenis Duralumin

Yang dimaksud dengan proses pengecoran dalam penelitian ini adalah proses *melting*, *pouring* dan *solidification* dengan kontrol variasi penambahan unsur tembaga (persentase berat), ketebalan produk cor (mm), dan tekanan vakum (kg/cm^2).

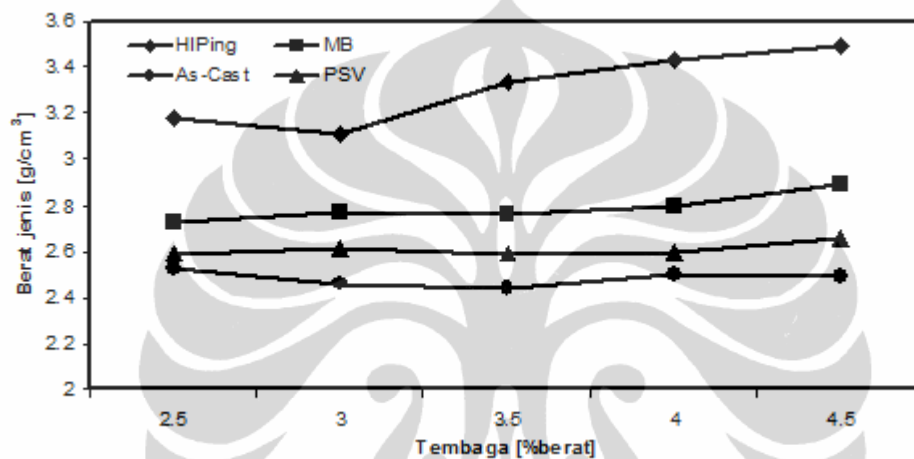
Untuk memudahkan pemahaman tentang porositas maka berat jenis duralumin dalam penelitian ini dikelompokkan atas 4 macam yaitu; 1). Berat jenis teoritis duralumin basis MB (γ_{TeorisMB}), 2). Berat jenis teoritis duralumin basis proses HIPing ($\gamma_{\text{TeorisHIP}}$), 3). Berat jenis *as-cast* duralumin cor ($\gamma_{\text{as-Cast}}$) dan 4). Berat jenis duralumin cor tungku PSV (γ_{CastPSV}). γ_{TeorisMB} dihitung berdasarkan kandungan % berat unsur (lihat Tabel 4.4.), $\gamma_{\text{TeorisHIP}}$ merupakan hasil uji *picnometry* setelah dilakukan proses HIPing, γ_{CastR} merupakan hasil uji *picnometry* duralumin cor dari tungku reverberatory, dan γ_{CastPSV} merupakan hasil uji *picnometry* duralumin cor dari tungku PSV. Perbandingan ke-4 macam berat jenis duralumin dengan tebal spesimen 10 mm seperti dalam Gambar 4.8. Dalam eksperimen nilai masing-masing berat jenis paduan Al-4.5Cu untuk; $\gamma_{\text{TeorisMB}} = 2.89 \text{ g/cm}^3$, $\gamma_{\text{TeorisHIP}} = 3.49 \text{ g/cm}^3$, $\gamma_{\text{CastR}} = 2.49 \text{ g/cm}^3$, dan $\gamma_{\text{CastPSV}} = 2.66 \text{ g/cm}^3$. Sebagai pembanding berat jenis pengecoran paduan Al-4.5Cu mempunyai $\gamma_{\text{Cast}} = 2.73 \text{ g/cm}^3$, dan berat diasumsikan $\gamma_{\text{Teoris}} = 2.80 \text{ g/cm}^3$ seperti diasumsikan oleh Suzuki dkk. [13]. Permasalahannya, $\gamma_{\text{TeorisHIP}}$ pada Al-3.0Cu lebih rendah dari Al-2.5Cu diduga karena pengaruh unsur paduan minor yang membentuk senyawa intermetalik yang keras menyerupai jarum-jarum sehingga proses HIPing nya tidak maksimal seperti; Al_3Fe , $\text{Al}_3(\text{Fe}, \text{Mn})$, $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$. Menurut Polmear [5] kehadiran fasa intermetalik dalam paduan aluminium meningkatkan porositas.

Secara umum, Gambar 4.8. menunjukkan adanya kecenderungan naiknya berat jenis dengan bertambahnya % tembaga dalam duralumin dengan tingkat kenaikan ($\tan.\alpha$) yang berbeda yaitu perbandingan kenaikan berat jenis dengan persen tembaga. Hasil tersebut sesuai dengan kesetimbangan massa yang menyatakan berat jenis campuran (duralumin) merupakan jumlah dari perkalian fraksi dan unsur yang terkandung didalamnya. MB sering digunakan untuk memprediksi berbagai fenomena yang terjadi dalam ilmu material dan metalurgi, seperti memprediksi kekuatan berdasarkan mikrostruktur atau unsur kimia dalam material tersebut. Secara berurut nilai-nilai $\tan.\alpha$ disusun; $\gamma_{\text{TeorisHIP}} > \gamma_{\text{TeorisMB}} > \gamma_{\text{CastPSV}} > \gamma_{\text{CastR}}$, artinya penambahan tembaga pada tungku

reverberatory tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap perubahan berat jenis. Hal ini disebabkan unsur tembaga dalam pengecoran tungku reverberatory akan bereaksi dengan oksigen (udara) dan carbon (*flame*) dari atmosfer sekeliling dan membentuk inklusi Al_2O_3 dan Al_4C_3 seperti yang ditunjukkan dari hasil uji senyawa (XRD). Menurut Campbells [62] uap air diudara, *crucible*, dan kandungan air dalam *as-cast* akan terurai menjadi H_2 dan O_2 , selanjutnya H_2 larut dalam logam cair membentuk porositas dan O_2 membentuk lapisan oksida pada logam. Pengecoran duralumin dengan tungku PSV membatasi atau mengurangi pembentukan senyawa oksida dan karbida karena kontrol udara (vakum) dan sumber panasnya dari energi listrik. Proses vakum dalam tungku PSV dapat mengurangi kelarutan gas hidrogen $\pm 0,25 \text{ cm}^3/100\text{g}$ dari tekanan atmosfer ke tekanan proses ($0,263 \text{ kg/cm}^2$) lihat Gambar 4.8. Berat jenis teoritis basis MB (γ_{TeorisMB}) memperhitungkan semua unsur dan tidak memperhitungkan senyawa bukan metalik yang terbentuk atau oleh unsur yang hilang selama proses pengecoran duralumin. Berbeda dengan ketiga berat jenis yang lain, tingginya $\gamma_{\text{TeorisHIP}}$ dibanding ketiga berat jenis yang lain karena pengaruh dari kombinasi panas dan gaya mekanik (*thermomechanic*) pada proses HIP sehingga kemampuan bentuk meningkat, rongga yang terdapat dalam duralumin cor dapat dieliminasi (secara fisik tetapi secara kimia masih dipertanyakan) dan butir mikrostrukturnya lebih kecil (*finer*). Perlakuan *thermo-mechanical* dapat memberikan pengaruh kuat pada mikrostruktur dan sifat-sifat mekanik pada paduan aluminium. Hasil analisa mikrostruktur perlakuan *thermo-mechanical* menunjukkan sifat *anisotropy* turun karena densitas dislokasi tinggi, interaksi yang kuat antara dislokasi dan presipitat-presipitat, penyebaran distribusi presipitat menyerupai jarum (*needle*). Sekali lagi, perbandingan hasil uji (*Picnometry*) berat jenis coran ingot duralumin dengan berat jenis teoritis dapat dilihat pada Gambar 4.8. Perbandingan tersebut menunjukkan nilai berat jenis teoritis lebih tinggi dari berat jenis coran ingot duralumin artinya dalam coran ingot duralumin terdapat ruang kosong yang disebut porositas. Menurut Taylor dan McClain, Y.M. Li dan Li [63, 23] mengindikasikan cacat pengecoran (porositas) dengan berat jenis yang mana berat jenis *casting product* duralumin lebih rendah dari berat jenis teoritis.

Gambar 4.8. menunjukkan berat jenis duralumin hasil perhitungan basis MB dan proses HIP, kedua hasil perhitungan tersebut menunjukkan nilai berat jenis berbeda. Secara definitif berat jenis BM, proses HIPing, *as-cast*, dan PSV masing-masing adalah

berat jenis dari persen berat unsur duralumin, pengukuran berat jenis *as-cast* setelah diproses HIPing, pengukuran berat jenis *as-cast* (lihat Lampiran 2), dan pengukuran berat *remelt* duralumin dengan PSV. Perbedaan tersebut terjadi karena logam padat (duralumin) basis MB masih mempunyai cacat pengecoran (porositas) meskipun dalam jumlah relatif kecil karena ketidak teraturan susunan atom, sedangkan pada proses HIP porositas sudah tereleminasi. Dan perbedaan akan semakin nyata apabila kedua basis perhitungan tersebut digunakan pada *casting product* dari pengecoran vakum.



Gambar 4.8. Penambahan tembaga versus berat jenis

Penambahan unsur utama tembaga (2,5%Cu sampai 4,5%Cu) dalam paduan Al-Cu menunjukkan jenis paduan yang terjadi adalah hipo-eutektik. Kandungan tembaga tersebut memberikan informasi penting pada pembentukan mikrostruktur dan presipitasi, dan *mushy zone* dalam proses solidifikasi paduan Al-Cu. Mekanisme pembentukan porositas pada pengecoran duralumin umumnya dipengaruhi oleh 3 faktor utama, yaitu; unsur paduan, efek turbulensi, kelembaban udara sekitar. Haizhi [20] menyatakan unsur paduan mempengaruhi pembentukan porositas melalui tiga mekanisme. **Pertama**, unsur paduan dapat merubah rentang pembekuan paduan, bila rentang pembekuan berkurang *mushy zone* dalam solidifikasi material menurun selanjutnya porositas berkurang, **Kedua**, unsur paduan dapat membentuk intermetalik dendritik selama solidifikasi dan porositas dapat terbentuk disepanjang dendrite-dendrit intermetalik ini. **Ketiga**, unsur paduan dapat membentuk fasa *melting point* rendah dan tidak dapat mengisi apabila solidifikasinya diantara dendrite. Menurut Zhou dkk. [64] Mn dalam aluminium dianggap sebagai unsur pengotor, dan bila bersenyawa dengan Fe akan membentuk fasa *insoluble*. Kandungan

Mn dalam material eksperimen (duralumin) 4,5% Cu mempunyai unsur Mn yang kecil (0,0724% berat Mn) dibandingkan persentase 0,0% – 4,0% Cu (0,0756%-0,108% berat Mn).

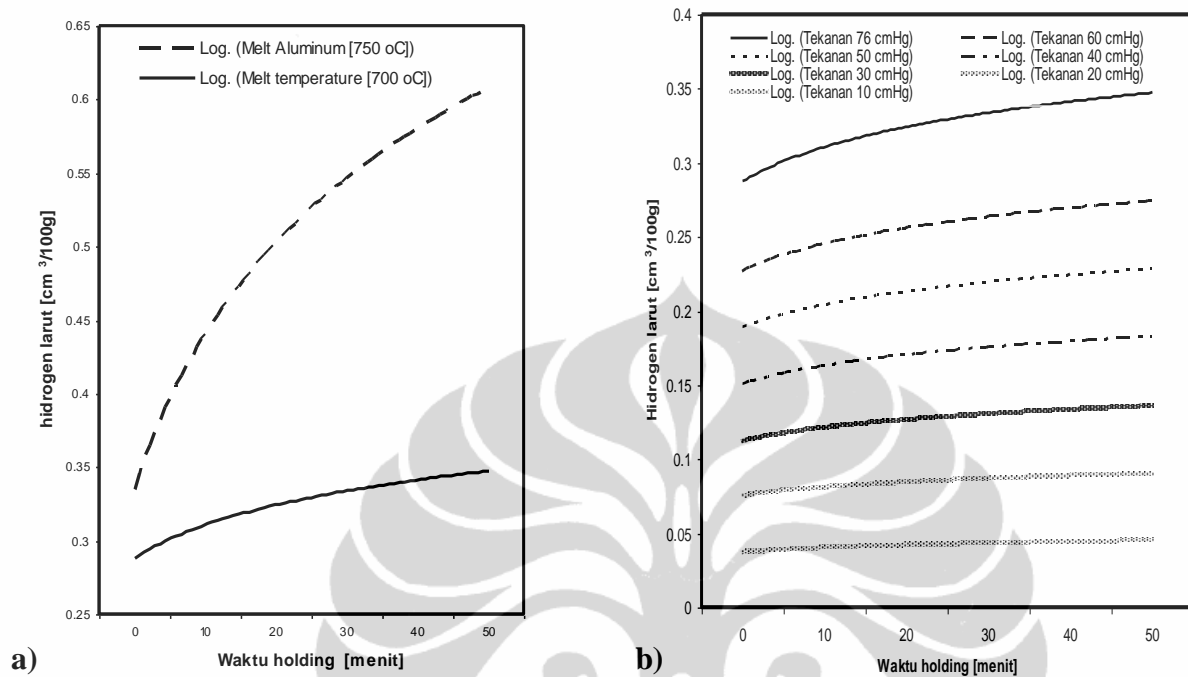
4.3.2. Pengaruh Tekanan Vakum dan Penambahan Tembaga terhadap Porositas Duralumin

Dalam kondisi cair aluminium dan tembaga termasuk logam yang mudah menyerap gas hidrogen dari sekelilingnya seperti; udara lembab, *grease* dan *oil*, kandungan air tungku, dan lain-lain. Proses solidifikasi yang cepat pada pengecoran menyebabkan gas hidrogen terjebak dan mengakibatkan terjadinya porositas dalam duralumin. Temperatur *melting* dan *pouring* yang tinggi tidak saja menambah kelarutan hidrogen tetapi meningkatkan gradien volume spesifik logam cair dan logam padat yang berpotensi menimbulkan kerutan biasa disebut porositas *shrinkage*. Menurut Haizhi [20] porositas dan morfologi pori dipengaruhi oleh kompleksitas kondisi solidifikasi dan unsur paduan. Pori yang terbentuk dalam paduan Al-Si *hypo-eutectic* mengindikasikan adanya penambahan porositas dengan bertambahnya unsur silikon karena bertambahnya fraksi luas daerah eutektik dimana pori terbentuk mengacu pada Park dkk [14]. Menurut Melo dkk. [30] porositas gas sebagai cacat pengecoran merupakan fungsi variasi paduan dan parameter proses.

Gambar 4.9. menunjukkan hidrogen larut dalam duralumin *melt* berkurang secara signifikan karena turunnya tekanan vakum, dan bertambah karena lamanya waktu *holding* tetapi kenaikannya tidak signifikan. Berkurangnya kelarutan hidrogen ini yang menyebabkan berat jenis pengecoran pada tungku PSV meningkat. Gambar 4.9. merupakan rekayasa konsentrasi hidrogen pada tekanan atmosfer (1 kg/cm²) untuk memprediksi kelarutan hidrogen pada parameter proses PSV. Umumnya metode *degassing* yang baik dapat mengurangi hidrogen hingga 0,06% sampai 0,1% [29]. Dalam penelitian ini, dasar perhitungan hidrogen larut dalam aluminium ini mengacu pada Gambar 2.8. Hal ini sesuai dengan pernyataan Sastry dkk. [65] bahwa "Kelarutan gas hidrogen dalam aluminium cair mempunyai kesetimbangan dengan gas hidrogen dalam atmosfer sekeliling". Dalam sistem kesetimbangan unsur dalam udara, kelarutan hidrogen

$$\text{dalam PSV } (S_p) \text{ dihitung berdasarkan pers.; } S_p = \frac{P_{p(T)}}{P_{a(T)}} \times S_h \quad (4.1)$$

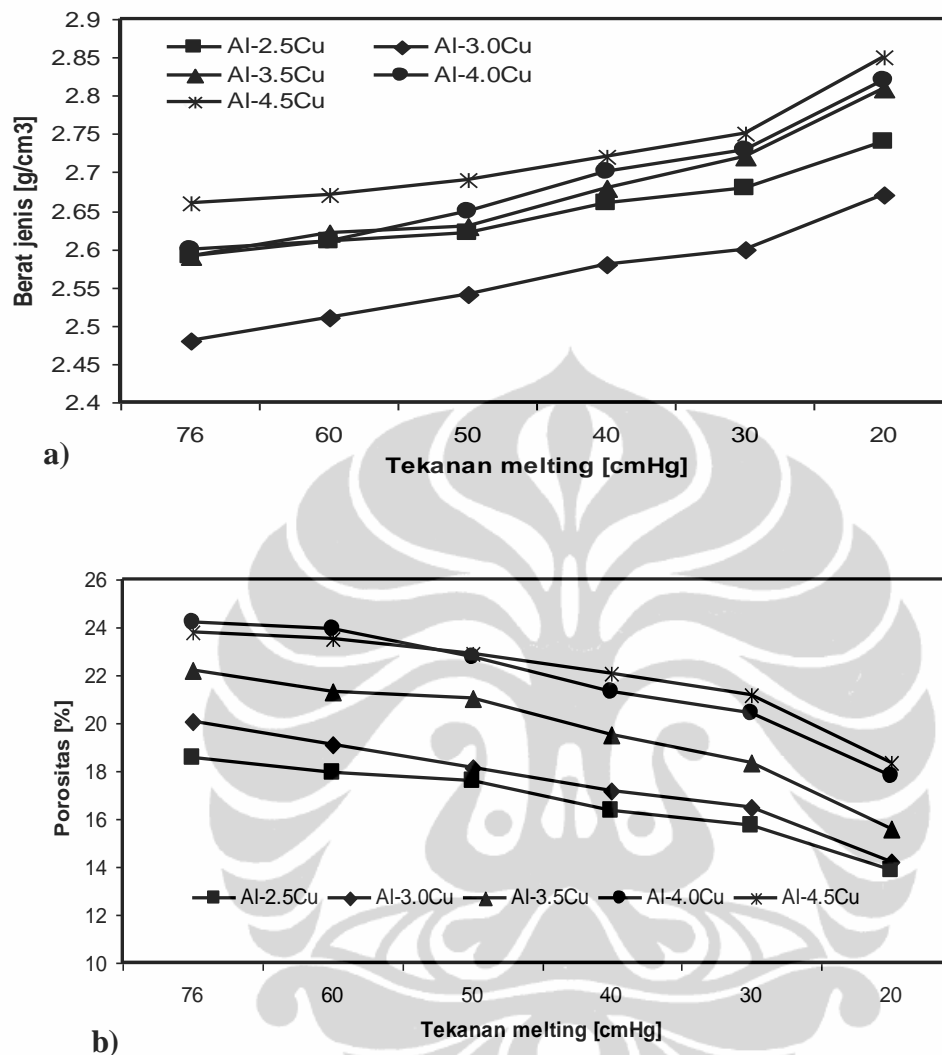
yang mana $P_{p(T)}$ [kg/cm^2], $P_{a(T)}$ [kg/cm^2], dan S_h [cm^3/g] masing-masing adalah tekanan proses pengecoran (vakum), tekanan atmosfer, dan hidrogen larut.



Gambar 4.9. Hidrogen larut dalam aluminium melt
a). Pengaruh temperatur [56], b). Pengaruh tekanan vakum

Dalam pengecoran sistem vakum (PSV), penurunan tekanan $0,132 \text{ kg}/\text{cm}^2$ berlangsung selama proses pengecoran (*melting*, *pouring*, dan *solidification*) menambah berat jenis dan diikuti menurunnya porositas duralumin cor seperti dalam Gb. 4.10. Kenaikan berat jenis dan penurunan porositas dalam duralumin tersebut masing-masing terkait dengan berat jenis tembaga yang tinggi dan penurunan kelarutan gas hidrogen dan oksigen dalam atmosfer pengecoran. Kembali ke Gb. 4.9. menyatakan semakin rendah tingkat kevakuman maka hidrogen terlarut dalam aluminium cair berkurang karena tekanan parsial hidrogen udara sekeliling rendah akibatnya porositas berkurang. Hal ini menunjukkan dengan berkurangnya tekanan udara maka secara kuantitatif masing-masing tekanan parsial dalam udara tersebut juga berkurang. Tekanan vakum dalam sistem kesetimbang mengacu pada proporsi (perbandingan) yang konstan. Dengan kata lain, pengaruh peningkatan tingkat kevakuman dari $1 \text{ kg}/\text{cm}^2$ sampai $0,263 \text{ kg}/\text{cm}^2$ berakibat pada penurunan kelarutan hidrogen $0,32 \text{ cm}^3/100\text{g}$ sampai $0,04 \text{ cm}^3/100\text{g}$ merupakan

fungsi yang sangat kuat (substansif) untuk menurunkan porositas sekitar 29,7% dari 22,22% menjadi 15,61%. Penentuan kuantitas porositas (%) produk pengecoran ditentukan dari referensi berat jenis yang digunakan, semakin kecil nilai berat jenis teoritisnya maka kuantitas porositasnya semakin rendah. Dalam produk-produk cor paduan aluminium kuantitas porositas yang diijinkan sekitar 3,6% dengan berat jenis teoritis $1,52 \text{ g/cm}^{-3}$ [66] dan 2,97% untuk proses *high pressure die casting* [67]. Selanjutnya dengan menurunnya tekanan udara kemungkinan pembentukan inklusi (pengotor) dalam duralumin kecil. Inklusi yang rendah memperlancar *feeding* sehingga *shrinkage* kemungkinan tidak terdapat dalam duralumin. Gambar 4.9. menunjukkan pengaruh tembaga terhadap porositas yang terjadi dalam duralumin pada tungku PSV yang dihitung dengan MB (a) dan HIPing (b). Tetapi penambahan tembaga dalam duralumin pada pengecoran sistem vakum memberikan kontribusi negatif terhadap porositas yaitu penambahan tembaga dari 2,5 %beratCu sampai 4,5%beratCu meningkatkan jumlah porositas dari 18,55% menjadi 24,2%, lihat gambar 4.10. Disamping itu perbedaan tingkat kevakuman antara *pouring basin* dan *riser* mempersingkat waktu *feeding* cetakan.

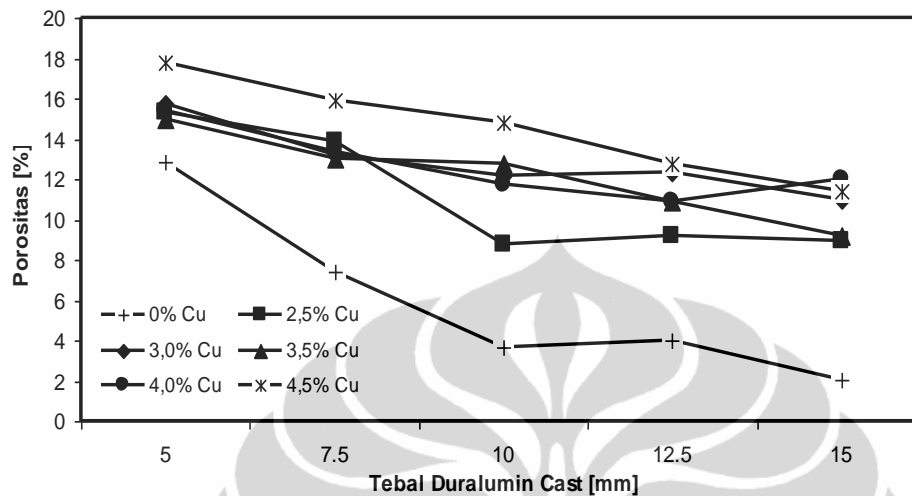


Gambar 4.10. Karakteristik PSV duralumin cor
a). Berat jenis duralumin, b). Porositas duralumin basis proses HIPing

4.3.3. Pengaruh Tebal Cor Duralumin terhadap Porositas Duralumin

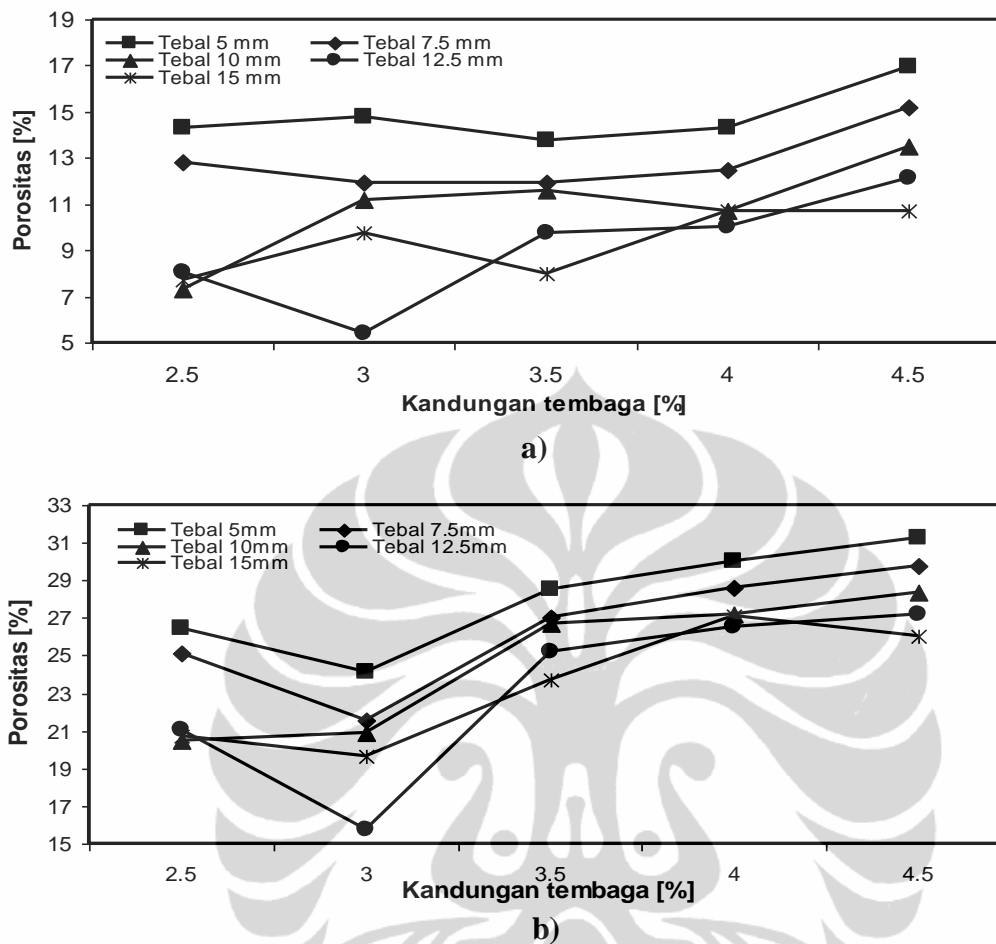
Hasil penelitian pengecoran duralumin dengan tungku reverberatory seperti dalam Gambar 4.11. menunjukkan bahwa *casting product* dengan ketebalan yang lebih tinggi mempunyai rentang solidifikasi yang panjang sehingga memberi kesempatan gas hidrogen untuk keluar dari duralumin *melt*. Dengan semakin tebalnya *casting product* duralumin maka gas hidrogen yang terjebak semakin sedikit akibatnya porositas gas dalam *casting product* tersebut menurun. Akan tetapi *casting product* duralumin dengan persentase tembaga tinggi mengakibatkan porositas gas bertambah, hal ini sejalan dengan

menurunnya mampu alir duralumin *melt* dengan bertambahnya %Cu seperti yang dinyatakan oleh Silva dkk. [68].



Gambar 4.11. Karakteristik duralumin pada *as-cast*

Gambar 4.12. merupakan perbandingan perhitungan porositas basis MB dan proses HIPing dari ingot duralumin. Gambar tersebut menunjukkan perbedaan porositas yang mana nilai persentase porositas basis proses HIPing lebih tinggi dari basis MB karena berat jenis proses HIPing lebih tinggi dari MB. Selama proses HIPing pori dalam casting tereliminasi akibatnya tidak ada pori pasca proses HIPing. Porositas basis MB dan proses HIP bertambah seiring dengan meningkatnya persentase tembaga dalam paduan tersebut. Berat jenis basis MB naik seiring penambahan tembaga tetapi tidak menunjukkan kenaikan yang signifikan dari penambahan tembaga tersebut. Dan nilai densitas massa basis MB dibawah nilai densitas massa basis HIP terjadi karena interdendritik dan kerapatan butir pada MB lebih rendah dibanding HIP. Dalam rekayasa proses HIP banyak digunakan untuk mereduksi cacat pengecoran (porositas) dalam paduan aluminium seperti yang dilakukan Manash dan Makhlof [31], proses HIP untuk menentukan densitas teoritis paduan aluminium. Secara substansial kedua basis perhitungan tersebut hanya menunjukkan referensi perbandingan.



Gambar 4.12. Kandungan tembaga versus Porositas
a). Porositas basis MB b). Porositas basis HIPing

Keterbatasan utama dalam pengecoran paduan aluminium adalah porositas yang terjadi waktu solidifikasi dan kontraksi. Menurut Metal [69] satu penyelesaian untuk menghilangkan porositas internal adalah *hot isostatic pressing*. Penambahan tembaga berakibat meningkatkan jumlah porositas dapat dipahami karena kelarutan hidrogen dalam tembaga lebih tinggi dibanding aluminium disamping itu penambahan tembaga meningkatkan temperatur duralumin *melt* sehingga hidrogen terlarut meningkat (kelarutan hidrogen fungsi dari temperatur). Menurut Suprpto dkk. [70] penambahan tembaga dalam paduan duralumin dapat meningkatkan berat jenis dan porositas, hal ini sudah sejalan dengan teori yang menyatakan suhu peleburan merupakan fungsi kelarutan hidrogen dalam pengecoran paduan aluminium. Disamping itu Gambar 4.13. juga mengindikasikan adanya kecenderungan kenaikan densitas duralumin seiring dengan

bertambahnya persentase tembaga hal ini terjadi karena densitas tembaga ($8,38\text{g/cm}^3$) lebih tinggi dari aluminium ($2,554\text{g/cm}^3$). Hasil tersebut sesuai dengan aturan kesetimbangan massa yang menyatakan berat jenis campuran (duralumin) merupakan jumlah dari perkalian fraksi unsur dan berat unsur yang terkandung didalamnya. MB sering digunakan untuk memprediksi berbagai fenomena yang terjadi dalam ilmu material dan metalurgi, seperti memprediksi kekuatan berdasarkan struktur-struktur atau jenis bahan dalam material tersebut. Ukuran dan jumlah porositas dapat dikurangi oleh pengaruh laju penuangan yaitu laju penuangan yang tinggi menyebabkan porositas meningkat dan sebaliknya laju penuangan yang rendah mengurangi terjadinya porositas. Tetapi dalam percobaan pengecoran *hypo-eutectic* (0 sampai 4,5%Cu) ini porositas bertambah dari sekitar 10% sampai 16% basis MB dan sekitar 17% sampai 28% basis HIP. Tingginya nilai porositas basis HIP dikarenakan proses HIP tidak mampu menghilangkan porositas terbuka dipermukaan tuang. Cacat pengecoran (porositas) diindikasikan dengan berat jenis yang mana berat jenis casting product duralumin lebih rendah dari berat jenis teoritis seperti yang dinyatakan oleh Y.M. Li dan Li., Taylor dan McClain [23, 63]. Penelitian disertasi ini menghasilkan nilai berat jenis teoritis proses HIP sebesar 2,98 sampai 3,49 g/cm^3 dan MB sebesar 2,56 sampai 2,89 g/cm^3 .

Gambar 4.13. menunjukkan pengaruh ketebalan terhadap porositas, semakin tipis coran duralumin porositas yang terjadi semakin tinggi karena gas hidrogen yang terjebak semakin banyak. Disamping itu ketebalan cor mengindikasikan laju pendinginan, semakin tebal benda cor maka laju pendinginannya semakin lambat dan meningkatkan keluarnya gas hidrogen terlarut dalam duralumin *melt* melalui proses difusi. Selain itu Gambar 4.6. juga menunjukkan kecenderungan penambahan tembaga menyebabkan jumlah porositas meningkat. Suzuki dkk [13] menyatakan jumlah porositas yang terbentuk pada pengecoran paduan hipoeutektik Al-Cu (4,5%Cu) sekitar 3% dan porositas tidak tergantung laju transformasi. Pengecoran paduan eutektik Al-Cu dengan kecepatan transfer 1 mm/min menghasilkan porositas sekitar 10% dengan bentuk silindris, tetapi ukuran dan jumlah porositas gas bertambah dengan dengan naiknya kecepatan transformasi. Ditahun yang sama Susuki melakukan pengecoran paduan Al-4.5Cu dan mengukur berat jenis hasil coran paduan tersebut 2.73g/cm^3 . Apabila diasumsikan berat jenis teoritis tanpa porositas 2.8g/cm^3 maka diprediksi jumlah porositas paduan Al-4.5Cu berkisar 2 – 6%. Pequet dkk. [12] menyatakan porositas gas dan

shrinkage dipengaruhi oleh kandungan gas, konsentrasi paduan, parameter nuklasi, laju pendinginan, dan gaya tarik. Hasil penelitiannya menunjukkan pengaruh struktur mikro pada paduan Al-4.5Cu untuk struktur *columnar* mikroporositas yang terjadi 8 – 10%.

Battaglia dan Rozot [29] dalam eksperimennya menyatakan, porositas tidak akan terjadi dengan tingkat hidrogen dibawah 0,15ml/100g atau dengan tekanan ekuivalent solidifikasi $0,789\text{kg/cm}^2$ atau 0,8 atm. porositas sebagai cacat pengecoran yang digambarkan sebagai pori skala mikro yang tersebar (dispersi) dalam volume *casting* hanya dapat terdeteksi dari pengukuran densitas dan mikroskop. Lee dan Hunt [4] menyatakan bahwa cacat porositas terjadi karena dua penyebab utama, yaitu 1). hidrogen dan 2). ketidakselarasan pengisian *shrinkage* volumetrik dalam solidifikasi. Pengendalian kondisi *melt* dan perlakuan *melt* secara substantif dapat mengurangi tingkat kelarutan hidrogen. Porositas primer atau interdendritik terbentuk ketika hidrogen yang cukup tinggi ditolak di awal pembekuan, mengakibatkan kejenuhan superkritis dan terbentuk gelembung. Porositas sekunder (ukuran mikron) terjadi ketika hidrogen terlarut rendah, dan pembentukan rongga terjadi pada konsentrasi hidrogen khas subkritis.

Berdasarkan persamaan Saltykov jumlah porositas ditentukan dari selisih berat jenis (berat jenis teoritis - berat jenis coran) dibagi berat jenis teoritis. Dalam penelitian ini berat jenis teoritis ditentukan dari MB dan proses HIPing. Uji OES pada bahan baku (ingot aluminium dan pipa tembaga) dan ingot duralumin, dan perhitungan berat jenis teoritis dari MB dapat dilihat pada Tabel 4.3. Umumnya penambahan tembaga dalam duralumin meningkatkan berat jenis teoritisnya, tetapi nilai berat jenis teoritis paduan Al-3.5Cu lebih rendah dari paduan Al-3.0Cu merupakan bentuk ketidak teraturan. Ketidak teraturan ini menunjukkan adanya kaitan kandungan besarnya (%berat) unsur paduan dengan berat jenis tinggi seperti Fe dan Zn. Kuantitas unsur Fe, Zn dalam paduan Al-3.5Cu dan Al-3.0Cu masing-masing adalah 0,108%Fe, 0,013%Zn dan 0,758%Fe, 0,073%Zn. Beberapa peneliti menunjukkan unsur-unsur mengontrol transisi dari β ke α tergantung pada jumlah Fe, Mn dan Cr, yang lebih dulu meningkatkan pembentukan β bertambah, sementara Mn dan Cr berkontribusi menstabilkan partikel-partikel α . Urutan panduan untuk mengurangi pengaruh jelek pada intermetalik besi adalah :

- Pertahankan tingkat kandungan besi rendah;
- Pertahankan rasio Mn/Fe lebih besar 0,5,
- Tingkatkan laju solidifikasi, dan

- Kurangi tingkat modifikasi eutektik.

Secara fisik dengan acuan MB dalam ingot duralumin menunjukkan berat jenis teoritis paduan Al-3.5Cu lebih rendah dari paduan Al-3.0Cu dapat dipahami. Rentang berat jenis teoritis ingot duralumin 2,5%Cu sampai 4,5%Cu adalah $2,56\text{g/cm}^3$ sampai $2,89\text{g/cm}^3$. Nilai berat jenis paduan aluminium tersebut tidak jauh berbeda dengan berat jenis paduan aluminium pada umumnya, contoh; menyebutkan berat jenis A356,2 adalah $2,69\text{ kg/cm}^3$ seperti yang dilakukan oleh Bokhyun dkk. [21].

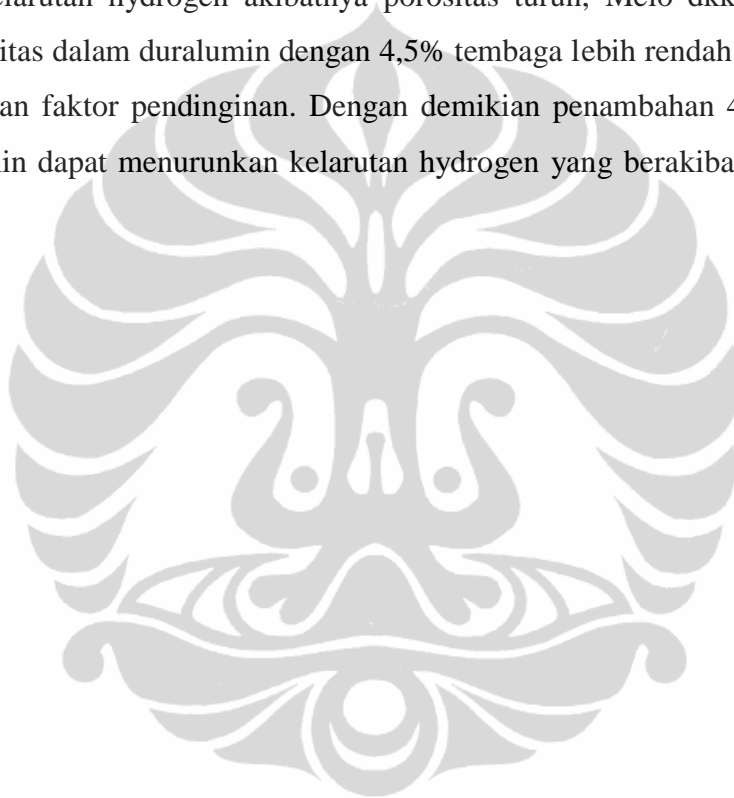
Hasil uji berat jenis (*picnometry*) coran duralumin dan komparasi berat jenis coran dengan berat jenis teoritis MB dalam Gambar 4.10. menunjukkan adanya porositas didalam coran duralumin tersebut. Proses pengepresan panas dengan tekanan konstan (proses HIPing) untuk menghilangkan porositas (*shrinkage, hydrogen pores*) yang terdapat pada material solid atau coran duralumin. Coran duralumin setelah proses HIPing dinyatakan sebagai berat jenis teoritis. Dan berat jenis teoritis hasil proses HIPing lebih tinggi dari berat jenis teoritis hasil analitik MB seperti terdapat dalam Tabel 4.4. Secara umum, penambahan persen berat tembaga dalam coran duralumin meningkatkan berat jenis teoritis proses HIPing tersebut. Tetapi berat jenis HIPing pada Al-3.0Cu ($3,11\text{g/cm}^3$) lebih rendah dari Al-2.5Cu ($3,18\text{g/cm}^3$) merupakan suatu bentuk ketidak teraturan yang disebabkan oleh adanya perbedaan kandungan ferro dalam duralumin tersebut. Seperti disebutkan dalam tinjauan pustaka unsur Fe yang berlebihan dapat membentuk fasa intermetalik (komplek) $\text{Al}_{15}(\text{FeMn})_3\text{Si}_2$, Al_5FeSi yang bentuknya menyerupai jarum dengan kekerasan tinggi sehingga tahanan proses HIPing meningkat. Contoh, inklusi senyawa besi dan mangan AlFeMnSi dengan struktur kristal heksagonal memiliki kekerasan antara 800 dan 1000 HV. *Squeeze pin* akan efektif digunakan untuk mengatasi terbentuknya cacat *shrinkage*. Akan tetapi bila *squeeze pins* terlalu awal, tekanan tersebar langsung ke rongga sebelum terjadi solidifikasi sehingga mengurangi kemampuan menghalangi *solidification shrinkage* daerah lokasi. Jika *squeeze pin* terlambat, solidifikasi berlanjut ke pengembangan *pin stroke* menjadi terbatas sehingga efektifitas pengurangan porositas berkurang, indikasi hambatan tersebut seperti dinyatakan oleh Wien [26].

Gambar 4.12b. untuk tebal coran 15mm menyatakan porositas meningkat seiring dengan penambahan tembaga dalam duralumin tetapi pada penambahan tembaga 4,5% porositas yang terjadi cenderung berkurang. Kondisi semacam ini menunjukkan anti-

klimak (*diminishing of return*) dari suatu peristiwa atau phenomena yang disebabkan oleh beberapa faktor, seperti ;

1. Pengaruh difusi dan solidifikasi yaitu perilaku kompetisi difusi dan solidifikasi, pengaruh paduan (tembaga) dan unsur-unsur lain. Menurut Sequeira dkk. [15] perilaku tembaga dan besi dalam paduan Al-Cu terutama pada kandungan 4,2 – 5,0% Cu mempunyai rentang *feeding* yang panjang sehingga dapat menyebabkan cacat penyusutan dan berakibat terjadinya *hot cracking*, dan untuk mencegah terjadinya porositas tersebut gradien panasnya diturunkan.
2. Pengaruh fraksi padat (*phasa α*) dalam *mushy zone*, mengacu pada Gambar 2.11. dan persamaan (2.1.) dinyatakan bahwa dengan bertambahnya % Cu dalam duralumin maka *phasa α* dalam paduan tersebut semakin berkurang. Dengan berkurangnya fraksi padat akan memberikan kesempatan (waktu) kepada hidrogen untuk keluar dari *mushy zone*, akibatnya pada kondisi dengan paduan dengan persentase tembaga tertinggi (4,5%Cu) menghasilkan porositas gas yang berkurang.
3. Batas kelarutan tembaga dalam aluminium, mengacu pada Gambar 2.12., yang mana paduan eutektik terjadi pada kandungan tembaga 33,2% wt Cu dengan batas kelarutan maksimumnya 5,7%wt Cu artinya material duralumin untuk eksperimen adalah hypoeutectic dengan kandungan tembaga 2,5 – 4,5% wt Cu. Proses pendinginan lanjut pasca solidifikasi, sebagian tembaga yang terlarut dalam duralumin *melt* keluar dari *phasa padat α* membentuk endapan (presipitat) disekeliling *phasa* tersebut. Batas kelarutan tembaga dalam paduan tersebut ditentukan oleh garis transformasi, dengan semakin bertambahnya tembaga dalam duralumin maka kandungan tembaga dalam presipitat semakin meningkat. Besarnya kandungan tembaga dalam presipitat mempunyai keterkaitan dengan pembentukan porositas maksimum. Pernyataan tersebut didukung oleh hasil penelitian Haizhi [20] menyatakan kandungan tembaga dalam paduan Al-Si dari 0-1% Cu akan meningkatkan porositas tetapi diatas 1%Cu porositas yang terbentuk tidak mengalami perubahan.
4. Pengaruh unsur pengotor (*manganese* dan *ferro*), kandungan Mn dalam duralumin 4,5% Cu mempunyai unsur Mn yang kecil (0,0724% berat Mn) dibandingkan persentase 0,0% – 4,0% Cu (0,0756%-0,108% berat Mn). Penurunan jumlah porositas pada duralumin dengan persentase tembaga 4,5% disebabkan oleh rendahnya unsur *manganese* dalam duralumin. Uji OES duralumin dengan persentase 4,5% tembaga

mempunyai kandungan Fe tinggi (1,32%Fe) dibanding duralumin yang lain. Girard dkk. [71] menyatakan unsur Fe dalam paduan aluminium akan membentuk fasa intermetalik yang menyebabkan struktur berbutir *equiaxed*. Bukti empirik kelarutan *hydrogen* pada aluminium murni lebih tinggi dibanding paduan Al-4,5Cu. Paduan aluminium mempunyai sensitifitas yang berbeda terhadap penyerapan hidrogen berikut porositasnya, Colas [72]. Penambahan tembaga dan silikon mengurangi kelarutan hydrogen, dan magnesium meningkatkan kelarutannya. Laju pendinginan yang tinggi mengurangi kelarutan hydrogen akibatnya porositas turun, Melo dkk. [30]. Kasus turunnya porositas dalam duralumin dengan 4,5% tembaga lebih rendah dibandingkan 4,0% disebabkan faktor pendinginan. Dengan demikian penambahan 4,5% tembaga dalam duralumin dapat menurunkan kelarutan hydrogen yang berakibat menurunnya porositas.



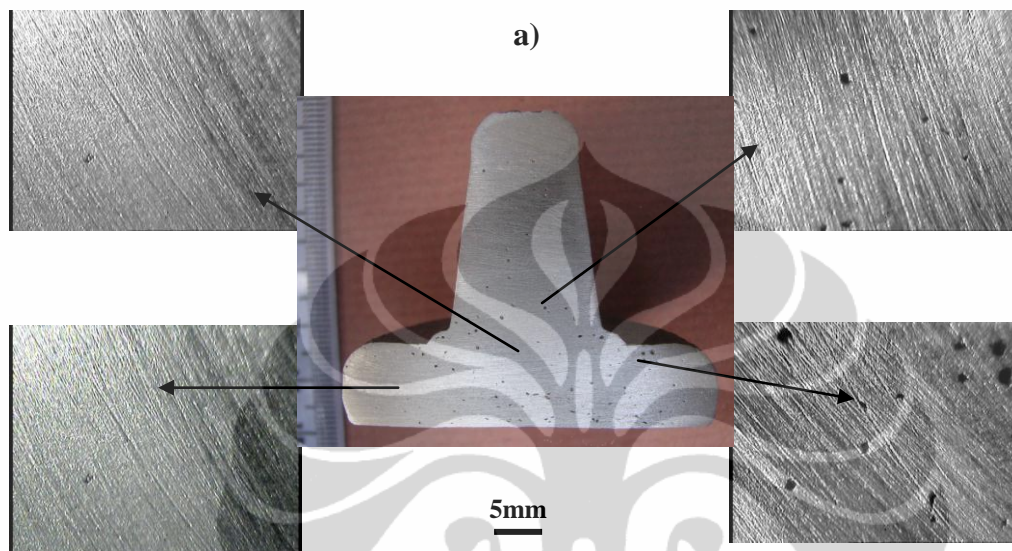
4.4. Pengaruh Parameter Pengecoran terhadap Mikrostruktur Duralumin

Bentuk, dimensi, dan distribusi butir merupakan besaran-besaran metalografi paduan aluminium tuang yang sering kaitan dengan karakteristik material seperti sifat mekanik, porositas, dan mampu bentuk. Besaran metalografi tersebut dipengaruhi oleh laju solidifikasi, dan hasil-hasil studi menyatakan bahwa jarak antar lengan dendrit mengecil dengan berkurangnya waktu solidifikasi (laju pendinginan tinggi). Dengan kata lain, ukuran lengan dendrit berkurang dengan meningkatnya laju solidifikasi. Bertambahnya kandungan komposisi paduan mempengaruhi kenaikan laju pendinginan. Laju pendinginan yang konstan pada ketebalan yang lebih kecil menyebabkan jarak lengan dendrit akan turun dan sebaliknya pada ketebalan yang tinggi menyebabkan jarak lengan dendrit akan bertambah besar. Umumnya, mikrostruktur *columnar* yang terbentuk oleh mekanisme solidifikasi kelarutan paduan dengan tingkat gradien temperatur yang rendah dan sedikit turbulensi dalam peleburan memberikan pengaruh pengecilan mikrostruktur karena lengan-lengan dendrit terpotong oleh gerak turbulensi tersebut. Dengan kata lain, turbulensi dalam aliran logam menyebabkan mikrostruktur logam paduan terdiri dari struktur *columnar* dan *equiaxed*. Dari data dan pembahasan metalografi dapat dinyatakan bahwa porositas meningkat seiring dengan penambahan tembaga dalam duralumin tetapi pada penambahan tembaga 4,5% porositas yang terjadi cenderung menurun.

Uji image yang dilakukan dengan *scanning electron microscopy* (SEM) dan *X-ray diffraction* (XRD) masing-masing dimaksudkan untuk mengklarifikasi jenis porositas (*gas* atau *shrinkage*) dan senyawa yang terjadi (Al_2Cu). Jenis porositas *shrinkage* dan kandungan gas tinggi akan muncul dalam proses solidifikasi. Kedua jenis porositas tersebut dapat dibedakan secara mikroskopik yaitu; porositas *shrinkage* membentuk kelompok, bentuknya tidak beraturan, dan permukaannya kasar, porositas gas terbentuk secara terpisah dengan bentuk *spherical* dan permukaannya halus. Dari identifikasi SEM dengan pembesaran 700x maka jenis porositas yang terjadi dalam eksperimen pengecoran vakum adalah jenis porositas akibat pengaruh gas yang terlarut (porositas gas). Menurut Lulay dkk. [9] pengujian *microscopy* pembesaran 20x dapat mempertegas evaluasi perubahan mikrostruktur. Dari pengamatan SEM dapat dipastikan bahwa morfologi porositas yang terjadi pada pengecoran tungku vakum mengarah pada bentuk jenis

porositas gas lihat Gambar 4.13, 4.14, 4.15. Morphologi porositas gas hasil pengamatan photo SEM dapat dilihat pada Tabel 4.5.

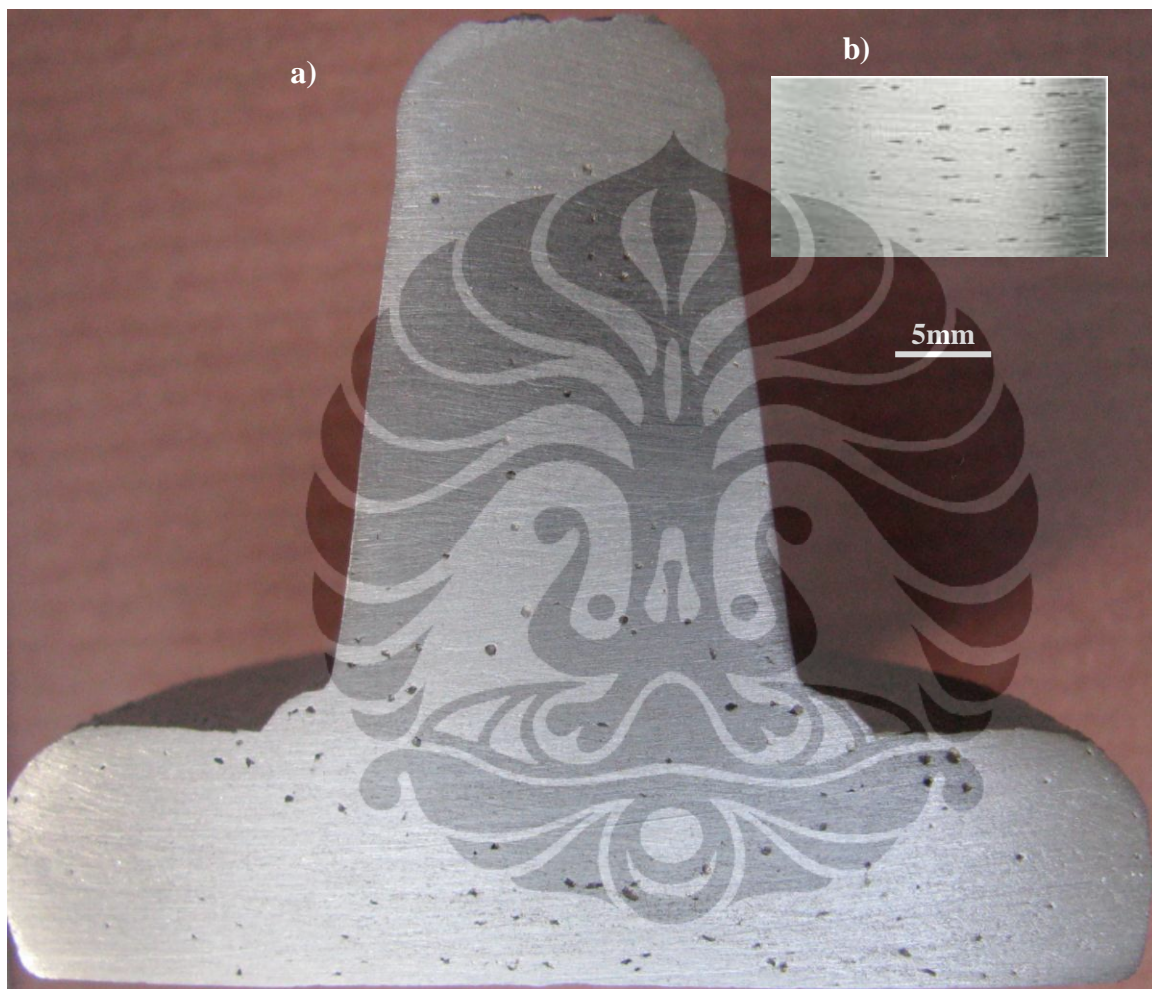
4.4.1. Pengaruh Tembaga dan Derajat Vakum Terhadap Makrostruktur Duralumin



Gambar 4.13. Distribusi porositas dalam duralumin

Informasi metalografi duralumin dari *as-cast* dan tungku PSV dengan variasi penambahan tembaga dan derajat kevakuman diperlukan sebagai konfirmasi (validasi) porositas gas dalam spesimen tersebut. Data uji metalografi (*image*) meliputi; porositas, batas butir, dan mikrostruktur dengan menggunakan mikroskop optik dan SEM. Selanjutnya secara kualitatif *image* porositas tersebut dibandingkan dengan porositas dari uji kuantitatif (Picnometry). *Image* metalografi dalam penelitian ini dengan pembesaran makro (20x) untuk distribusi porositas dan pembesaran mikro (100x) untuk jenis dan ukuran butir. Pembesaran makro untuk mengamati distribusi porositas dalam produk cor pada bagian; *riser*, *hot spot*, dan tepi lihat Gambar 4.13. Bila bagian tersebut dikaitkan dengan laju pendinginan maka bagian tepi laju pendinginannya tinggi, *riser* laju pendinginan sedang, dan *hot spot* laju pendinginan lambat. Pengamatan distribusi menunjukkan makropori tidak ditemukan pada bagian tepi tetapi porositas mengelompok pada bagian; *riser*, *hot spot*. Hal ini menunjukkan pembentukan porositas pada duralumin mengikuti mekanisme pembentukan presipitat (lihat Gambar 2.9.). Dalam mekanisme solidifikasi, unsur tembaga sebagai paduan ditolak dari aluminium padat ke *melt*

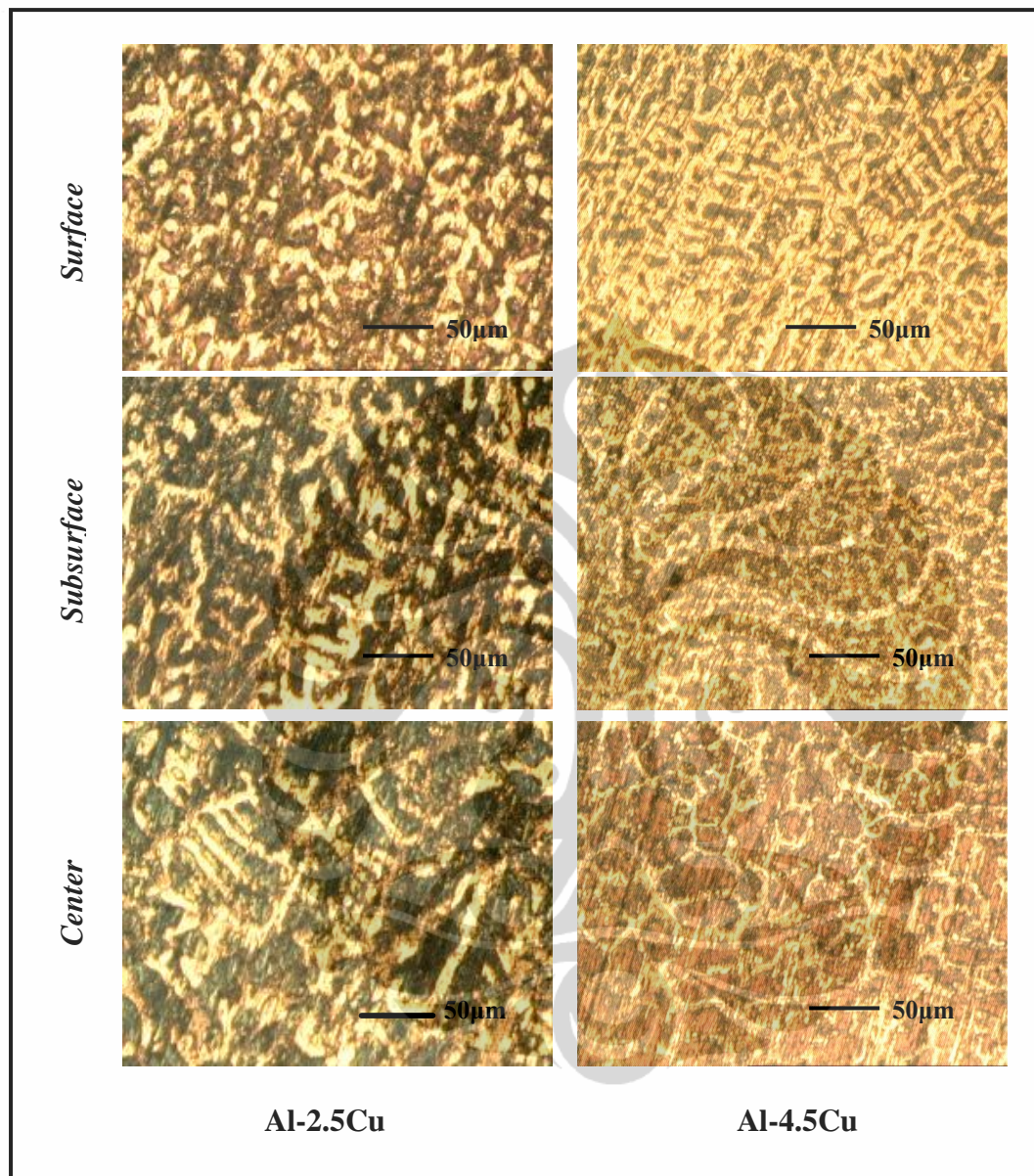
membentuk presipitat sesuai batas kelarutannya. Pasca solidifikasi dalam duralumin terbentuk fasa padat α dan fasa baru atau presipitat. Dalam solidifikasi tersebut menyebabkan gas hidrogen terakumulasi pada bagian yang panas dan bergabung dengan tembaga membentuk presipitat.



Gambar 4.14. Komparasi porositas duralumin dalam skala yang sama
a). Spesimen penelitian, b). Hasil penelitian Suzuki [13]

Komparasi distribusi porositas hasil penelitian (Gambar 4.14a.) dengan hasil penelitian Suzuki dkk. [13] (Gambar 4.14b.) secara visual menunjukkan kerapatan porositas hasil penelitian lebih rendah dari Suzuki. Tetapi bila hasil analitik dan visual dikomparasikan hasilnya berbeda meskipun masing-masing porositas dihitung dengan pers. 2.6 dan 2.7. Secara kuantitatif perbandingan penelitian hasil, eksperimen 11 – 17% dan Suzuki 2 – 6% hal ini disebabkan oleh proses perlakuan dan refrensi (berat jenis) yang berbeda. Yang mana Suzuki menggunakan bahan baku dari ingot aluminium murni dan paduan Al-40Cu sehingga suhu meltingnya rendah dan waktu peleburannya lebih singkat akibatnya hidrogen yang larut dalam aluminium cair lebih rendah. Selanjutnya hasil pengecoran (Al-4,5Cu) tersebut diroll dan berat jenis yang dihasilkan relatif tinggi (2.73g/cm^3). Metode yang digunakan Suzuki biasa disebut perlakuan *thermo-mechanical*. Berbeda dengan proses pengecoran dalam penelitian disertasi, yang mana bahan bakunya ingot aluminium dan pipa tembaga yang dilebur pada temperatur tinggi ($1200\text{ }^\circ\text{C}$) dan waktu yang lama akibatnya hidrogen larut dalam duralumin besar. Selanjutnya ingot duralumin tersebut dilebur ulang (*remelt*) dalam tungku PSV, dalam proses PSV hidrogen yang terkandung dalam duralumin *melt* ditarik keluar oleh mekanisme difusi karena kandungan hidrogen atmosfer lebih rendah dari duralumin *melt*. Akibat *remelt* tersebut berat jenis duralumin bertambah dari 2.66g/cm^3 menjadi 2.85g/cm^3 . Metode yang digunakan dalam PSV dapat disebut perlakuan *thermo-chemical*. Sama seperti dalam kasus pembentukan kristal, presipitasi hidrogen dapat terjadi sebagai akibat dari nukleasi heterogen atau homogen. Nukleasi paling kuat untuk presipitasi hidrogen adalah oksida, terutama oksida dengan turbulensi pada *gating, pouring*, memindahkan logam *melt*, dan menangani udara atau gas yang terperangkap. Dengan keberadaan fase-fase inti, presipitat hidrogen mudah terjadi pada kelarutan hidrogen tingkat terlarut relatif rendah.

4.4.2. Pengaruh Tembaga Terhadap mikrostruktur Duralumin



Gambar 4.15. Mikrostruktur as-cast duralumin tebal 7,5mm (450x)

Gambar 4.15. secara umum menunjukkan perubahan mikrostruktur karena pengaruh penambahan tembaga dalam duralumin. Geometri butir mikrostruktur duralumin (Al-2.5Cu dan Al-4.5Cu) dengan tebal berbeda hasil pengecoran tungku reverberatory seperti dalam Gambar 4.15. Yang mana paduan Al-2.5Cu dan Al-4.5Cu masing-masing menunjukkan bentuk butir *elongated* dan *globurated*, dan diameter butirnya lebih besar dari paduan Al-4.5Cu, artinya penambahan unsur tembaga meningkatkan laju pendinginan duralumin *melt* akibatnya dihasilkan mikrostruktur *finer*

dan DAS kecil. Menurut Taylor dan McClain, Y.M. Li dan Li [63, 23] cacat pengecoran (porositas) diindikasikan dengan berat jenis yang mana berat jenis *casting* duralumin lebih rendah dari berat jenis teoritis. Distribusi butir dari *surface* ke *center* secara konsisten mengarah ke bentuk globular hal ini dipengaruhi oleh kehadiran tembaga yang bersifat sebagai inoculan, meskipun sebagian kecil butir ada yang berbentuk *equiaxed*. Secara keseluruhan gambar mikrostruktur untuk pengaruh tembaga mencerminkan perkembangan butir oleh reaksi difusi terus-menerus selama solidifikasi, meskipun orientasi acak dibagian *center* mungkin mencerminkan kontribusi dari pembesaran butir. Dari Gambar 4.15. dapat diinterpretasikan bahwa konsentrasi unsur paduan (tembaga) dapat mempengaruhi pembentukan mikrostruktur dendrit yaitu dari struktur butir dendrit *elongated* ke mikrostruktur *globular*.

Tabel 4.5. Butir mikrostruktur duralumin

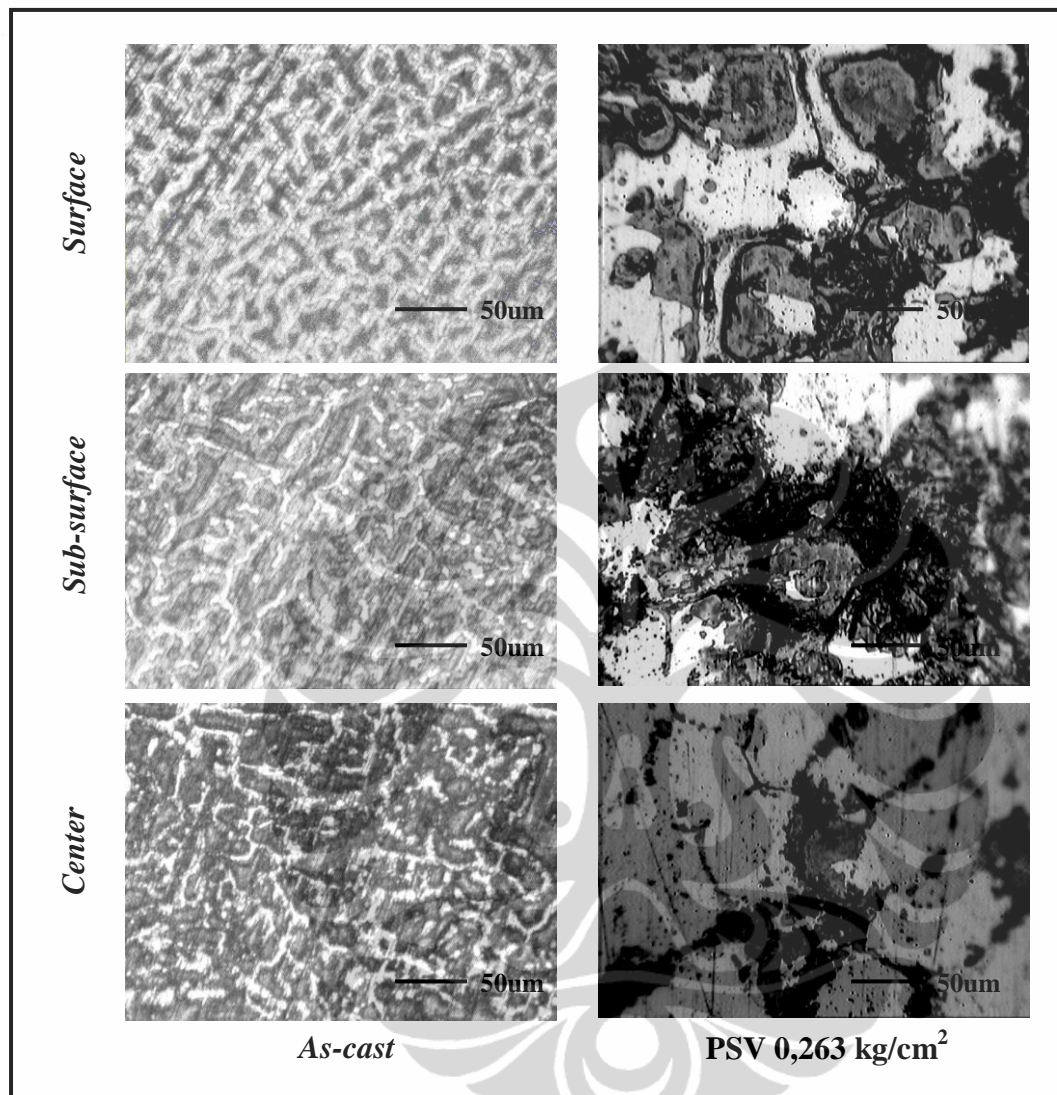
Paduan	Tebal [mm]	Butir mikrostruktur [um]
Al	10	24,7
Al-2.5Cu	10	24,4
Al-3.0Cu	10	23,5
Al-3.5Cu	10	22,5
Al-4.0Cu	10	21,6
Al-4.5Cu	10	20,5

Perbedaan geometri mikrostruktur yang mana duralumin dengan persentase tembaga kecil (2,5%Cu) mempunyai geometri lebih tebal dibandingkan persentase tembaga besar (4,5%Cu) lihat Gambar 4.15. Dan bagian tepi coran mempunyai geometri mikrostruktur lebih tipis dibanding bagian dalamnya. Kedua fenomena tersebut menunjukkan adanya perbedaan kecepatan pendinginan yang berbeda yaitu bagian *surface* laju pendinginannya lebih besar dari bagian *subsurface* dan bagian *subsurface* laju pendinginannya lebih tinggi dari bagian *center* cor. Dengan kata lain tipis-tebalnya geometri mikrostruktur hasil coran ditentukan oleh cepat-lambatnya laju pendinginan. Pernyataan tebal tipisnya geometri tersebut didukung oleh data pengujian dimensi butir dalam Tabel 4.5. Menurut Garcia dkk.[73] *cooling-rate* selama solidifikasi dipengaruhi oleh Cu pada kandungan Cu rendah nilai SDAS besar (46 μm) dan kandungan Cu tinggi (3,0% dan 3,8%) nilai SDAS kecil. Penambahan tembaga 4,0% dan 4,5% pada *casting*

product duralumin tebal 10mm memperbesar d_{butir} hal ini menunjukkan bahwa ketebalan memperlambat laju pendinginan sehingga menghasilkan d_{butir} lebih besar. Kasperovich dkk. [74] dalam eksperimen menyatakan struktur butir, termasuk butir-butir kasar pada pusat *billet* sangat dipengaruhi kecepatan pengecoran dan komposisi paduan.

Klasifikasikan solidifikasi berdasarkan laju pendinginan cepat dan lambat masing-masing diasumsikan untuk tebal 5,0mm sampai 7,5mm dan 10,0mm sampai 15mm. Indikasi laju pendinginan cetakan permanen dapat dilihat pada Gambar 4.16. Penggunaan cetakan permanen untuk *casting* tipis termasuk proses solidifikasi pendinginan cepat sehingga gas hidrogen larut dalam duralumin *melt* terjebak didalamnya akibatnya terbentuk porositas lebih banyak dibandingkan *casting* tebal seperti dijelaskan dalam Sub BAB 4.1.3. Penentuan jenis porositas dalam pembahasan ini didasarkan pada identifikasi porositas dalam Sub BAB 2.5.1. Menurut Battaglia dan Rozot [29], mekanisme solidifikasi paduan biner, disebutkan dendrite membentuk jejaring sehingga terjadi media yang porous. Fenomena cacat porositas oleh gas hidrogen dan *shrinkage* masing-masing terjadi dalam badan *disk* dan *riser*. Berdasarkan bentuknya *micro-porosity* dibedakan atas dua macam yaitu; 1). porositas gas karena kelarutan hidrogen dalam cairan yang tinggi dan membentuk gelembung-gelembung, akibatnya disekeliling aluminium padat dikelilingi gelembung. 2). Kontraksi volumetrik (*inter-dendritic*) saat solidifikasi disebut *shrinkage*. Pada logam, umumnya transformasi cair ke padat disertai dengan penurunan volume. Penyusutan volumetrik paduan aluminium yang terjadi selama pembekuan berkisar 3,5-8,5%. Kecenderungan pembentukan *shrinkage* ini terkait dengan fraksi volume cair/padat pada saat akhir solidifikasi, dan kisaran suhu solidifikasi paduan. Secara praktis pengecoran yang baik menggunakan komposisi jarak solidifikasi panjang seperti paduan aluminium-tembaga dan aluminium magnesium, jarak solidifikasi pendek ini sangat pentingnya untuk penyusutan interdendritik. Paduan ini rentan terhadap *microporosity* dari proporsi tinggi yang disebabkan oleh perbandingan *feeding* tinggi yang terjadi secara *interdendritical*. Masalah *shrinkage* bertambah oleh kompleksitas geometri, seperti variasi ketebalan, laju pembekuan, *feeding*, dan efektivitas *gating* dan *riser*.

4.4.3. Pengaruh Jenis Proses Terhadap Mikrostruktur Duralumin

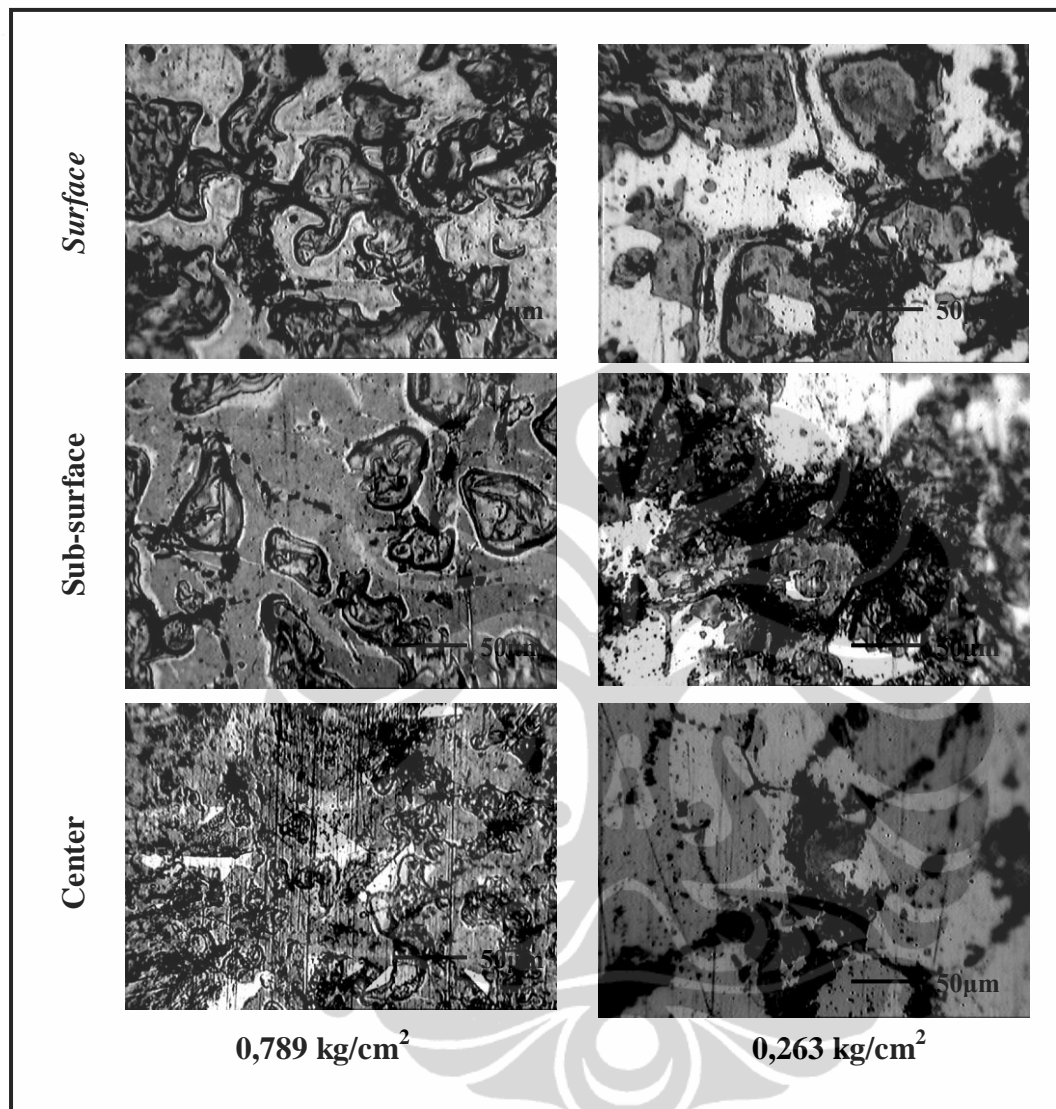


Gambar 4.16. Komparasi mikrostruktur Al-4.5Cu

Gambar 4.16. menunjukkan perubahan geometri butir mikrostruktur spesimen untuk posisi tepi (*surface*), dalam (*sub-surface*), pusat (*center*) dan kondisi pengecoran (reverberatory dan PSV tekanan *melting* $0,263 \text{ kg/cm}^2$). Pengecoran reverberatory menghasilkan butir mikrostruktur *elongated* dengan ketebalan yang meningkat ke arah pusat spesimen dan PSV menghasilkan butir mikrostruktur *globular* dengan diameter butir bertambah besar ke arah pusat spesimen. Karakteristik mikrostruktur pengecoran tungku reverberatory tersebut disebabkan arah solidifikasi pada sisi tegak lurus (tebal) lebih cepat dari arah radial (diameter) sehingga struktur butirnya cenderung *elongated* dan solidifikasi bagian tepi (permukaan) mengalami laju pendinginan lebih besar dari

bagian dalam dengan demikian proses pertumbuhan inti lebih cepat dari perkembangan intinya sehingga ketebalan butir bertambah kebagian dalam coran. Pada solidifikasi apabila laju pertumbuhan inti lebih cepat dari laju perkembangan inti akan terbentuk butir yang *finer* (kecil), dan apabila laju pertumbuhan inti lebih lambat dari laju perkembangan inti akan terbentuk butir yang *coarse* (besar). Untuk PSV menghasilkan mikrostruktur relatif *globular* dengan butir *coarse* dari pengecoran reverberatory hal ini disebabkan oleh pengaruh tekanan vakum yang mempercepat proses *feeding* dan menghambat proses solidifikasi kearah tegak lurus sehingga pengisian rongga cetakan serempak dan perkembangan butir kesegala arah. Laju pendingin tertinggi terdapat pada bagian tepi produk cor dan berkurang dengan bertambahnya kedalaman ketebalan. Selanjutnya perbedaan gradian pendinginan menyebabkan bentuk dan dimensi butir berubah dan butiran kecil terlihat dekat permukaan dan ukuran membesar dengan bertambahnya kedalaman. Mungkin butir pada permukaan berbentuk *elongated* (pipih) kearah dalam bertransformasi menjadi *elongated-pancake* (oval) atau butir permukaan berbentuk *equiaxed* kearah dalam bertransformasi menjadi *spheroidal*, Giles dkk. [75]. Dengan demikian laju pendinginan merupakan salah satu faktor untuk mengatur morfologi dan dimensi butir mikrostruktur paduan aluminium (duralumin).

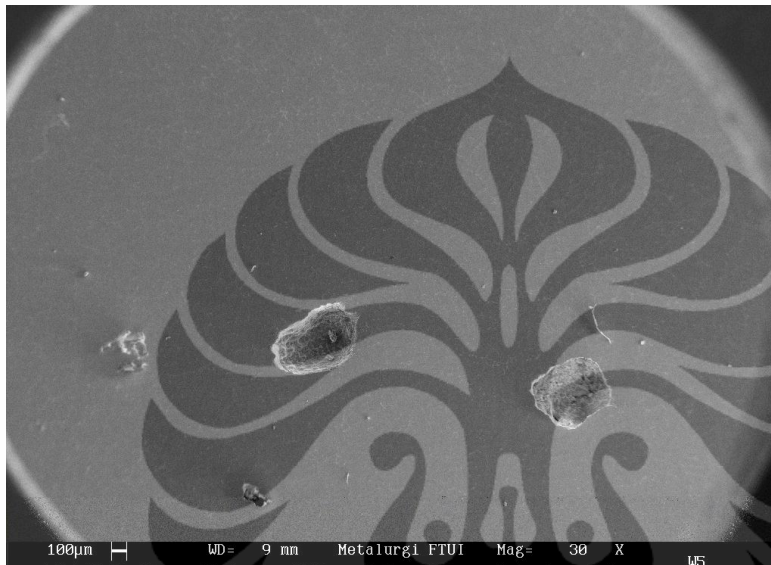
4.4.4. Pengaruh Tekanan Vakum Terhadap Mikrostruktur Duralumin



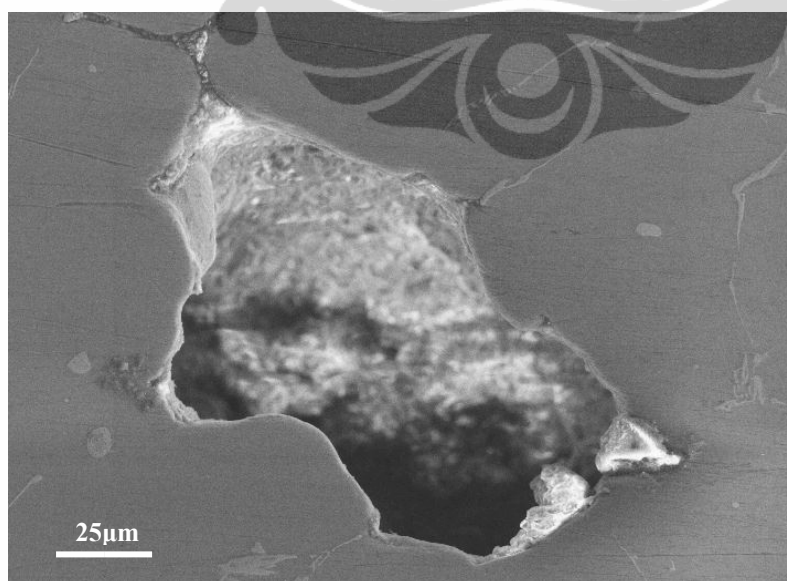
Gambar 4.17. Komparasi mikrostruktur Al-4.5Cu, Tebal 10mm (450x)

Pengamatan lebih lanjut, pengaruh derajat kevakuman dalam proses PSV terhadap butir mikrostruktur (lihat Gambar 4.17.). Gambar 4.17. menunjukkan perubahan bentuk dan besar mikrostruktur dari tekanan peleburan 0,263 kg/cm² ke tekanan peleburan 0,789 kg/cm². Dari sisi bentuk, perubahannya mengarah ke bentuk yang lebih *globular* dan dari dimensinya menjadi lebih besar. Hal ini terjadi karena gas terlarut dalam duralumin cair yang tersebar membentuk presipitat dan menghalangi perkembangan dendrit akibatnya ukuran dendrit menjadi *finer*. Pada kevakuman tinggi (0,263 kg/cm²) kelarutan hidrogennya rendah dan kevakuman rendah (0,789 kg/cm²) kelarutan hidrogennya tinggi. Akibatnya solidifikasi dari dari *melting* tekanan 0,263

kg/cm^2 menghasilkan diameter butir lebih kecil dari proses *melting* tekanan $0,789 \text{ kg/cm}^2$. Analogi pengecilan butir tersebut terjadi karena gas (udara) yang terperangkap dalam logam cair setelah pengadukan akan terdispersi secara merata dan bereaksi dipusat nuklasi menyebabkan mikrostruktur *finer* yaitu sebelum pelarutan gas diameter ekuivalen $70 \mu\text{m}$ dan sesudah pelarutan diameter ekuivalen $40 \mu\text{m}$. Dengan kata lain bila nuklasi lebih cepat dari pertumbuhan butir akan terbentuk butir *finer*.



Gambar 4.18a. Makro porositas (SEM)



Gambar 4.18b. Mikro porositas duralumin pada PSV

Dalam solidifikasi pengecoran rongga *shrinkage* bentuk lubangnya besar-besar dan tidak beraturan seperti dalam Gambar 2.11b. Cacat ini terjadi apabila *supply* isian logam cair pada bagian pengecoran terputus atau tidak cukup mengalir sehingga terkompensasi oleh *shrinkage*. Jenis cacat seperti ini terjadi dibagian pengecoran yang pendinginannya lebih lambat dari bagian sekeliling dan terpotong dari *supply* logam *melt*. Gambar 4.12. menunjukkan jenis porositas duralumin dalam PSV, umumnya *shrinkage* bertambah dengan berkurangnya kriteria bilangan Niyama, Meric [24]. Pengamatan Gambar 4.18. menunjukkan porositas coran duralumin dengan variasi 4.5%Cu dan tekanan 0,263kg/cm² cenderung bulat dan terpisah satu dengan lainnya. Jika bentuk porositas silindris (*spherical*), dindingnya halus, dan porinya tersebar diseluruh bagian produk coran dapat dipastikam bahwa porositas itu umumnya disebabkan oleh hidrogen larut dan terperangkap. Dan mikrostruktur digunakan untuk mengamati bentuk dan dimensi butir struktur pada bagian pusat, dalam permukaan (*sub-surface*), dan permukaan. Pembesaran *image* (SEM) 30x sebagai pembesaran makro untuk menunjukkan makro porositas (Gambar 4.18a), dan SEM 400x sebagai pembesaran mikro untuk menunjukkan mikro porositas (Gambar 4.18b) dari paduan Al-4.5Cu pada tekanan melting 0,263kg/cm². Gambar 4.18a. menunjukkan porositas yang terpisah satu dengan lainnya atau terdistribusi dan bentuknya baik pada skala makro maupun mikro cenderung melingkar (*spherical*) dari indikasi tersebut dapat dipastikan jenis porositas tersebut adalah porositas gas, hasil *image* yang lain dapat dilihat dalam lampiran 3. Sekali lagi dapat dikatakan, porositas tersebut terjadi bukan karena pengisian logam cair (*feeding*) yang kurang baik dalam skala mikro (dendritik) maupun makro (penyusutan volume) karena sudah diantisipasi dengan *riser*. Distribusi porositas tersebut tidak menunjukkan adanya bentuk-bentuk kelompok atau koloni yang saling berhubungan tetapi terpisah dengan batas yang jelas dengan demikian penyebab porositas tersebut adalah gas (hidrogen) yang terperangkap karena bentuknya menyerupai bola. Indikasi jenis porositas tersebut seperti disebutkan dalam BAB II (sub 2.5.) tentang porositas.

4.5. Fasa-Fasa Dalam Duralumin

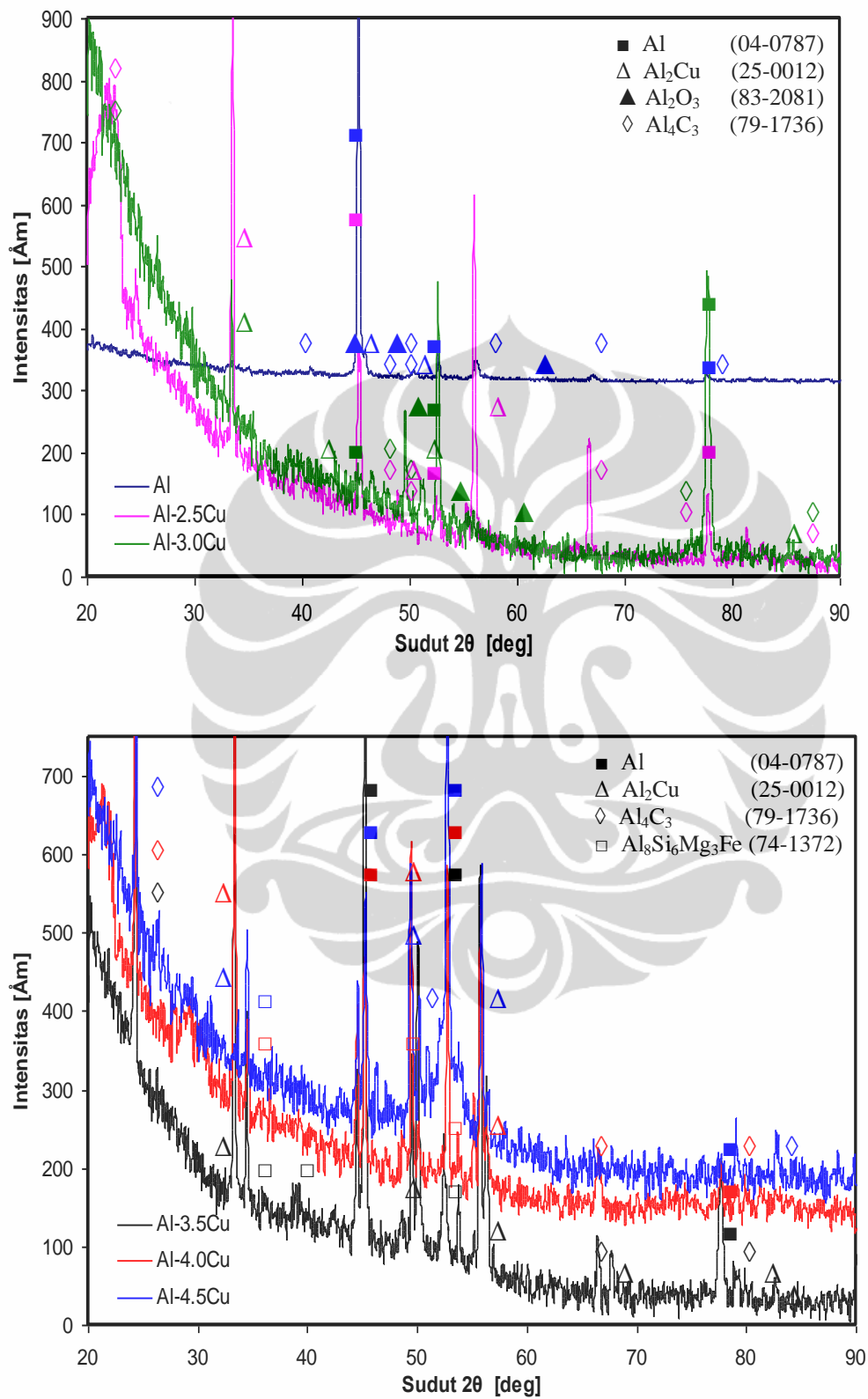
Kasus dalam pengecoran paduan aluminium masih banyak ditemukan cacat mikro yang disebabkan tidak terkontrolnya temperatur tuang, komposisi kimia, dan kondisi cetakan. Untuk mendapatkan berbagai sifat yang diinginkan biasanya sulit diperoleh dari satu jenis material murni oleh karena itu dibuat sistem paduan. Proses solidifikasi dalam paduan aluminium dapat untuk memprediksi porositas mikro, pertama ditentukan oleh aliran fluida interdendrit PDAS dan SDAS. Faktor kedua adalah penambahan unsur paduan, kandungan gas dalam udara, dimensi coran, dan konduksi termal bahan cetakan. Reaksi aluminium dengan macam-macam unsur metalik menghasilkan fasa *binery* metalik. Paduan aluminium banyak digunakan untuk berbagai keperluan karena mampu tuang, ketahanan korosi dan sifat mekaniknya. Untuk memperbaiki kekuatannya tergantung pada jumlah Cu dan Mg. Unsur Cu dan Mg membentuk fasa kedua seperti Al_2Cu dan Mg_2Si yang akan menghilangkan pengaruh jelek dari partikel intermetalik Fe seperti $Al_{15}(Fe,Mg)_3Si_2$ yang menyebabkan morfologi kompleks yang dapat diketahui dari uji XRD. Tetapi uji XRD hanya menampilkan file APD atau DAT yang belum memberikan pemahaman tentang senyawa sehingga file tersebut harus ditransfer ke file Excel.

Partikel-partikel *fracture* Si, Cu, dan Fe selalu terjadi dalam partikel-partikel *brittle* khususnya Si dan Fe. *Fracture* pada Al_2Cu disebabkan oleh dekatnya $Al_{15}(Fe,Mg)_3Si_2$. *Cooling-rate* selama solidifikasi berpengaruh retakan partikel-partikel silikon dalam paduan terlarut (T4) pada Cu rendah dan Cu tinggi yang terpengaruh oleh tegangan yang terjadi, Kasperovich dkk. [74]. Biasanya penurunan temperatur yang diijinkan untuk presipitat fasa Al_2Cu dan fasa $Al_{15}Mg_8Cu_2Si_6$ antara 500 – 470 °C. Menurut Dobrzanski dkk. [34] laju pendinginan tinggi akan membentuk fasa *secondary dendrite arm spacing* (SDAS) yang *fine* (26,6 μm) dan laju pendinginan yang rendah akan terbentuk fasa SDAS yang *large* (79,06 μm).

4.5.1. Pengaruh Tembaga Terhadap Fasa Inklusi Duralumin

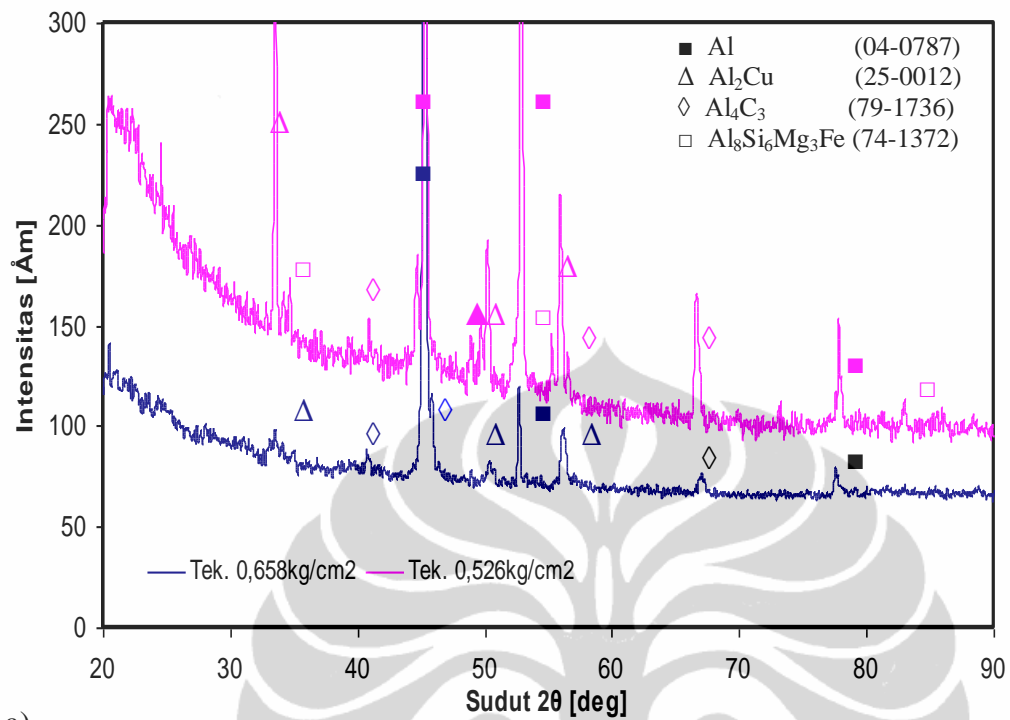
Setiap kristal unsur mempunyai bentuk *X-ray powder* yang *unique* karena posisi garis yang tergantung pada ukuran unit *cell*, dan intensitas garis juga tergantung pada jenis-jenis kehadiran atom dan tatanan kristalnya. Ada beberapa cara untuk mengidentifikasi dengan karakterisasi *fingerprint*, jadi material solid yang tidak diketahui dapat diidentifikasi dari bentuk powder yang *unique*. Pengamatan secara langsung dilakukan dengan identifikasi material solid yang tidak diketahui dan dibandingkan dengan bentuk powder referensi standar yang disebut *powder diffraction file* (PDF). Dalam literatur terdapat puluhan sampai ribuan bentuk PDF yang sudah diketahui (dalam lampiran 4).

Fasa yang terbentuk dari *remelt* duralumin dalam tungku PSV diamati dengan XRD. Hasil pengamatan XRD ditunjukkan dalam diagram sudut 2θ versus intensitas puncak, pada duralumin kemungkinan terbentuk fasa-fasa; α -Al, β -Cu, AlCu, Al₂Cu, AlCu₃, Al₂Cu₃, Cu₉Al₄, Al₂O₃, CuO, Al₄C₃, Al₁₅(Fe,Mg)₃Si₂, MgAl₂O₄, dan MgO. Menurut Raghavan [39] sistem paduan binary paduan Al-Cu mempunyai berbagai fasa intermediate seperti; CuAl₂ (C16-type tetragonal, disimbulkan θ), CuAl (monoclinic, η), Cu₅Al₄(LT) (monoclinic, ζ), ϵ 2 (NiAs-type hexagonal), ϵ 1(bcc), Cu₃Al₂ (rhombohedral, δ), Cu₉Al₄(HT) (γ_0), Cu₉Al₄(LT) (D83-type cubic, γ_1), and Cu₃Al (bcc, β). Dan pembentukan fasa-fasa duralumin dipengaruhi unsur dalam material dan atmosfer seperti; unsur udara, dan unsur mangkok. Dalam beberapa literatur disebutkan konsentrasi mangan di atas 0,4% dapat memberikan perlindungan terhadap perekatan sehingga paduan bebas terhadap pengaruh jelek fasa Al₅FeSi (berbentuk plat). Gas hidrogen merupakan satu-satu elemen gas yang dapat larut dalam aluminium cair, kelarutan hidrogen tersebut mempunyai kesetimbangan dengan gas hydrogen dalam atmosfer sekeliling, Staley dkk. [76]. Hasil pengamatan XRD (grafik sudut 2θ vs intensitas puncak) seperti dalam Gambar 4.19., 4.20., 4.21. masing-masing untuk tekanan peleburan 1 kg/cm², 0,658 kg/cm², 0,526 kg/cm², dan variasi ketebalan coran pada tekanan 0,395 kg/cm² dan 0,263 kg/cm². Data karakteristik parameter uji XRD seperti sudut difraksi 2θ , intensitas puncak (*peak*) digunakan untuk menentukan jenis fasa pada *remelt* duralumin dapat dilihat pada Tabel 4.6. Untuk lebih jelasnya senyawa dalam duralumin PSV dapat dilihat dalam Lampiran 5 dan 6.

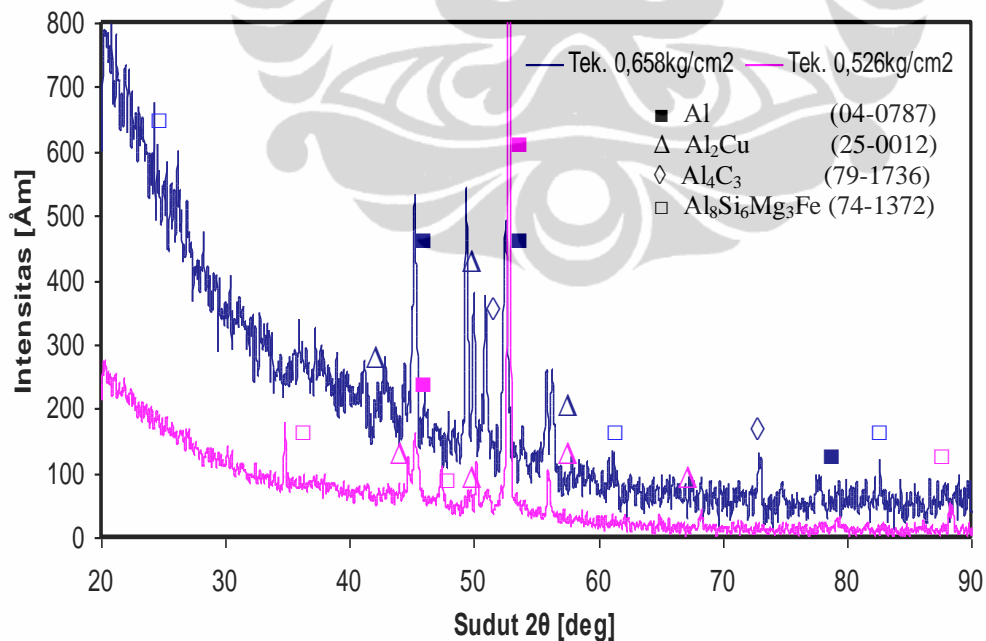


Gambar 4.19. Difraktogram *casting product* tekanan peleburan 1kg/cm^2

4.5.2. Pengaruh Tekanan Pengecoran Terhadap Fasa Inklusi Duralumin

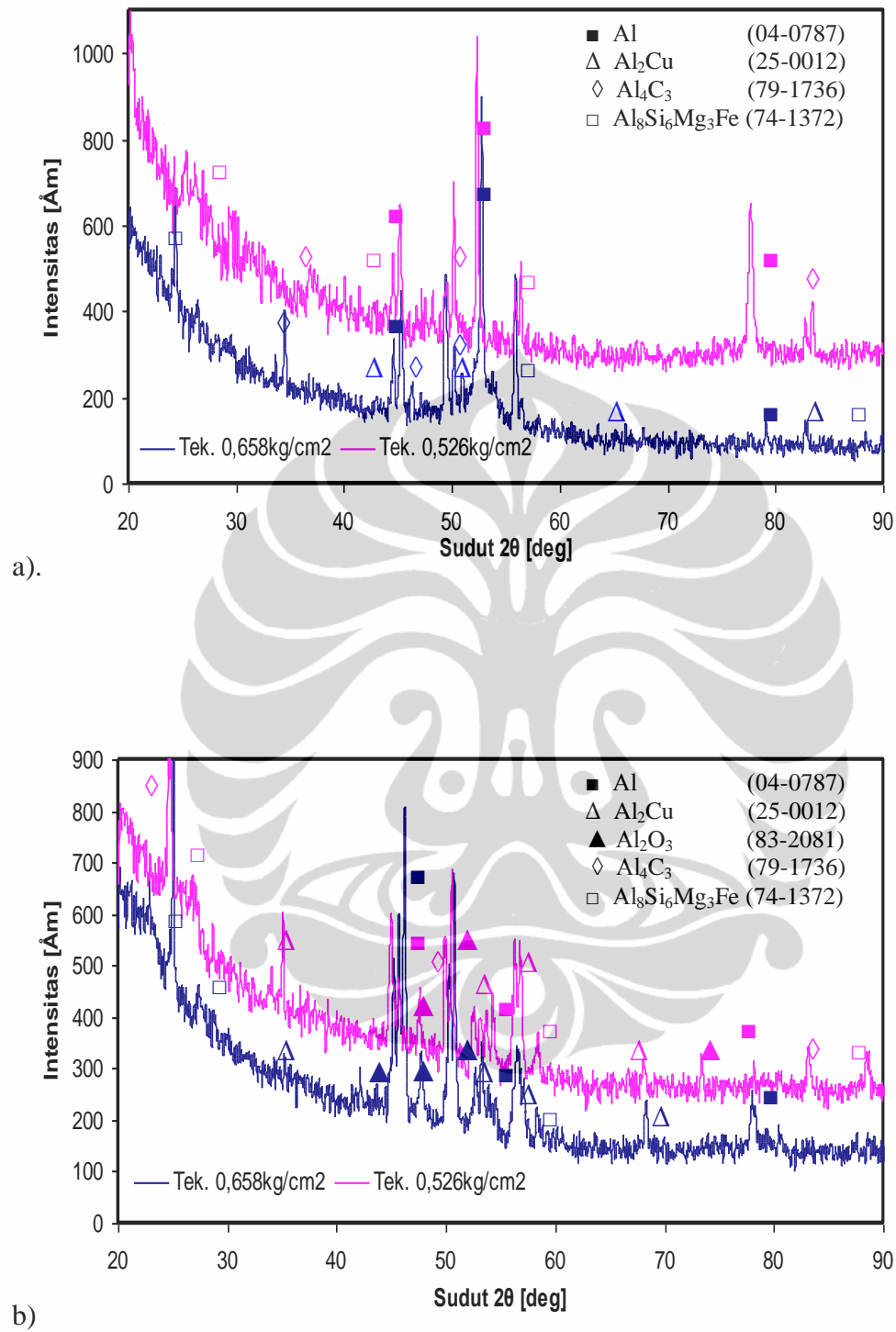


a)



b)

Gambar 4. 20. Difraktogram duralumin
a). Al-2.5Cu, b). Al-3.0Cu



Gambar 4.21. Difraktogram duralumin

a). Al-4,0Cu b). Al-4,5Cu

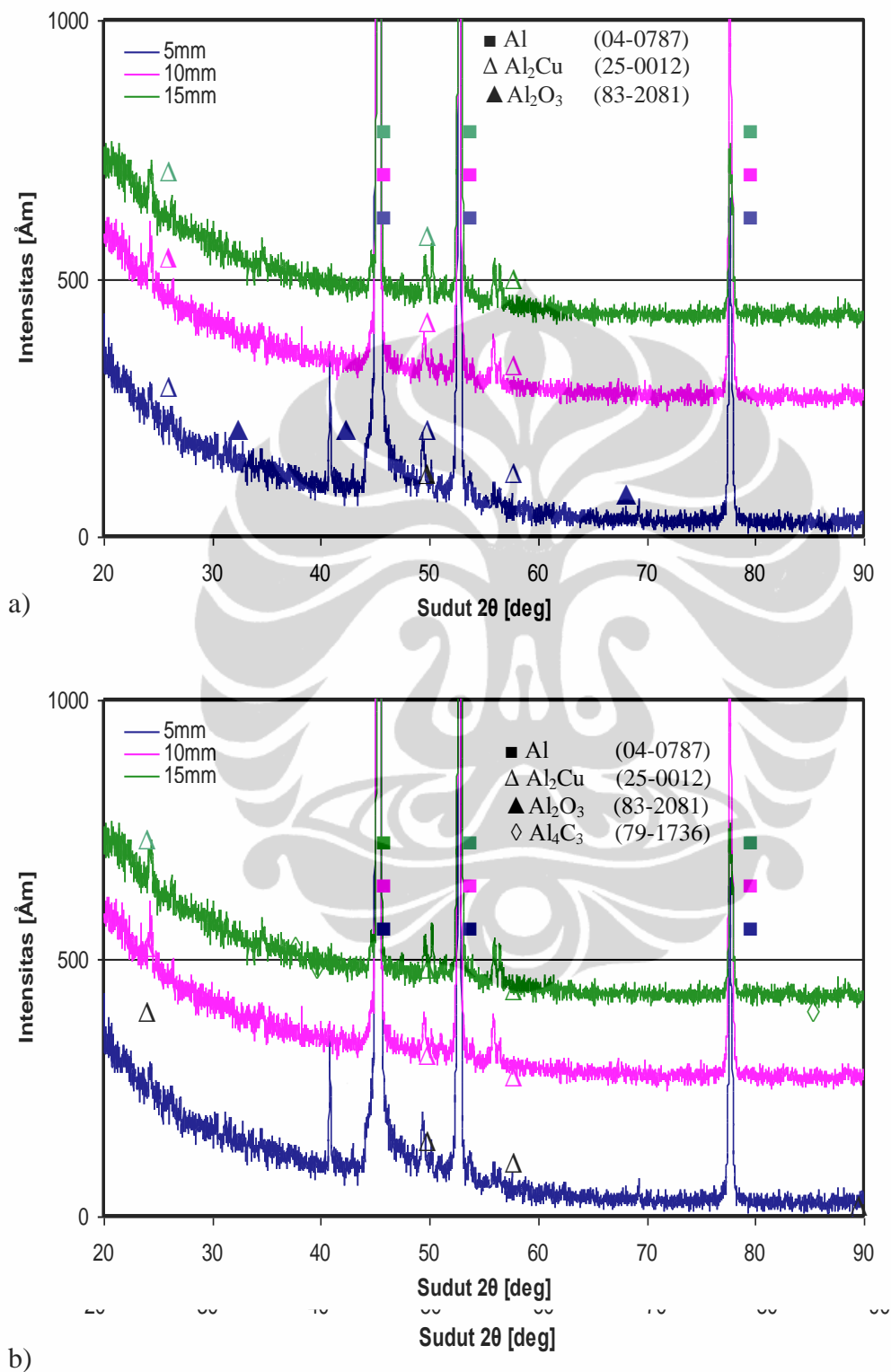
Pengaruh tekanan terhadap pembentukan fasa inklusi seperti ditampilkan dalam Gambar 4.19., Gambar 4.20. dan Gambar 4.21. Ketiga gambar tersebut menunjukkan besar intensitas dan banyak puncak sudut 2θ yang muncul. Umumnya peningkatan kevakuman menurunkan jumlah puncak sudut 2θ yang terjadi seperti dalam Gambar 4.20. dan 4.21. (2,5%Cu sampai 4,5%Cu). Kejadian tersebut disebabkan berkurangnya jumlah reaksi unsur duralumin dengan unsur dalam udara. Disamping itu intensitas pada tekanan vakum tinggi lebih kecil dari tekanan vakum rendah menunjukkan lemahnya reaksi tersebut karena %berat unsur dalam udara kecil. Pada Gambar peningkatan tekanan vakum mengurangi jumlah fasa yang terbentuk. Fasa oksida dan karbida yang terbentuk pada tekanan vakum tinggi ($0,263 \text{ kg/cm}^2$) jumlahnya lebih sedikit dari tingkat kevakuman rendah ($0,789 \text{ kg/cm}^2$). Tingkat kevakuman tinggi menghasilkan fasa tunggal $\alpha\text{-Al}$ lebih besar dari tingkat kevakuman rendah yaitu pada sudut 2θ ($77,49^\circ$) dengan intensitas tertinggi 1927\AA dihasilkan oleh vakum $0,263 \text{ kg/cm}^2$.

4.5.3. Pengaruh Tebal Cor Terhadap Fasa Inklusi Duralumin

Konsistensi dan homogenitas dari produk cor dalam fase padat adalah aspek utama teknologi pengecoran. Namun, homogenitas dalam proses pengecoran memberikan pengaruh penting pada kualitas produk cor. Kolom struktur kristal dan senyawa (rumusan kimia) merupakan hasil pencocokan (*matching*) sudut 2θ dan intensitas puncak hasil uji XRD spesimen dengan *powder diffraction file (PDF) standard* (dalam lampiran 4). Dari pencocokan tersebut dalam duralumin diperoleh senyawa $\alpha\text{-Al}$, $\beta\text{-Cu}$, Al_2Cu , seperti diagram fasa paduan Al-Cu dalam Gambar 2.9. Fasa Al_2Cu biasa disebut fasa theta (θ) yang diperlukan untuk memberikan efek penguatan dalam proses perlakuan panas. Fasa oksida seperti; Al_2O_3 , CuO , terjadi karena adanya kontak udara sekeliling dengan duralumin masih terjadi dalam kondisi vakum tetapi sudah pada tingkat intensitas puncak yang rendah. Mekanisme masuknya unsur oksigen dalam duralumin seperti dalam Gambar 2.11. Selain fasa utama dan fasa oksida dalam duralumin ditemukan fasa *carbide* yaitu Al_4C_3 , fasa *carbide* ini merupakan unsur carbon bawaan dalam ingot duralumin terjadi karena proses pengecorannya menggunakan lidah api (*flame*) dari kerosene (minyak tanah).

Dekomposisi eutektik selama solidifikasi membentuk campuran fasa atau partikel inklusi *coarse* yang terlarut seperti ; Al_2Cu , Al_2CuMg , dan Mg_2Si atau fasa tak-larut seperti; $\text{Al}_6(\text{Fe},\text{Mn})$, Al_3Fe , $\alpha\text{Al}(\text{Fe},\text{Mn},\text{Si})$, $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$. Kedua jenis fasa ini kekuatannya

rendah dan memperlihatkan garis mengelupas (*aligned stringers*) dalam arah garis kerja (*rolling*). Tetapi pengecoran duralumin (*hypo-eutectic*) dengan PSV juga terjadi fasa inklusi dan non-metalik seperti dalam Gambar 4.22. Pembentukan fasa nonmetalik pada tekanan vakum tinggi ($0,263 \text{ kg/cm}^2$) menghasilkan jumlahnya lebih sedikit dari tekanan vakum rendah ($0,789 \text{ kg/cm}^2$) dalam lampiran 4, hal tersebut menunjukkan bahwa atmosfer mempengaruhi pembentukan fasa khususnya oksida. Karena kestabilannya terganggu kehadiran unsur dalam udara. Hal ini ditunjukkan oleh puncak sudut 2θ . Puncak ini dianalogikan sebagai kuantitas peningkatan interaksi kimia dalam proses solidifikasi. Dalam kondisi vakum banyak dijumpai fasa tunggal $\alpha\text{-Al}$ dan Al_2Cu hal ini terjadi karena unsur Al dan Cu saling berikatan membentuk fasa-fasa baru. Dalam paduan *ternary* Al-Cu-Si terdiri tiga system paduan binary Al-Si, Al-Cu dan Cu-Si yang mempunyai satu transisi eutekti *ternary* yaitu $L \rightarrow \alpha(\text{Al}) + (\text{Si}) + \theta(\text{CuAl}_2)$ yang membentuk paduan $\text{Al}_{80.4}\text{Cu}_{13.6}\text{Si}_6$ pada 797 K , Giles dkk. [75]. Karakteristik mikrostruktur baru termasuk didalamnya besar kelarutan, pengecilan butir, kerataan distribusi, pembentukan fasa metastabil dan bertambahnya kerapatan cacat. Proses solidifikasi cepat lebih kompleks dari paduan binary. Pembentukan fasa baru dalam pengecoran tekanan vakum lebih solid dibanding pengecoran pada tekanan atmosfer. Oleh karena itu, perubahan tekanan PSV dalam paduan Al-Cu diikuti dengan pembentukan fasa metalik dan non metalik.



Gambar 4.22. XRD duralumin hasil PSV
 a). Tekanan vakum $0,395 \text{ kg/cm}^2$, b). Tekanan $0,263 \text{ kg/cm}^2$

4.6. Simulasi Analitik Pembentukan Porositas

Fenomena fisik, metalografi yang terjadi selama proses pengecoran vakum dapat diprediksi dengan pendekatan empirik dan simulasi (analitik). Fenomena fisik dan metalografi ini terkait dengan sifat hidrodinamik logam cair yang mengisi rongga cetakan sifat logam cair dengan sifat termal dan daerah *mushy*. Masing-masing pendekatan tersebut dari aspek substantif dan ekonomis mempunyai kekurangan dan kelebihan. Apabila kedua pendekatan tersebut dikomparasikan pendekatan simulasi lebih sederhana, singkat dan biayanya lebih rendah dari pendekatan empirik. Akan tetapi akurasi pendekatan simulasi dipengaruhi oleh asumsi sebagai batasan untuk menentukan kualitas fenomena yang diprediksi. Semakin banyak asumsi yang digunakan proses pengecoran maka prediksi semakin sederhana dan hasil yang diperoleh akurasi rendah. Dengan kata lain, faktor asumsi adalah faktor pengabaian sehingga prediksi proses pengecoran menjauhi kondisi aktual. Faktor pertimbangan standar yang harus diperhitungkan untuk memprediksi cacat pengecoran (porositas) terdiri dari; sifat panas logam tuang dan cetakan (seperti; konduktivitas, panas jenis, panas laten, pemuaian/penyusutan, difusi), sifat hidrodinamik logam cair (seperti; viskositas, jenis aliran, kemampuan alir, kekasaran permukaan, perekatan), dan sifat mekanik logam tuang (seperti; tegangan termal, tegangan permukaan).

Proses solidifikasi digunakan dalam berbagai metode Pabrikasi seperti pengecoran, pengelasan, perlakuan laser permukaan, dan pertumbuhan kristal. Dalam banyak kasus, produk dipersiapkan dari proses-proses ini digunakan dalam kondisi as-solidifikasi. Paduan Al-Cu (duralumin) sebagai material percobaan mempunyai unsur kimia; 2,49 – 4,49% Cu, 0,072 – 0,106 Mn, 0,145 – 0,696% Si, 0,009 – 0,304% Mg, 0,013 – 0,268% Zn, 0,108 – 1,32% Fe, 0,01 – 0,112% Sn, 0,002 – 0,032% Pb, 0,005% Ni, 0,001 – 0,005% Cr, 0,010 – 0,017% Ti seperti yang terlihat dalam Tabel 4.4. Sifat termodinamika material cair dan solid masing-masing terdapat dalam Tabel 4.7. dan Tabel 4.8. Sifat termodinamika tersebut diperlukan untuk menganalisis porositas dalam pengecoran logam khususnya pengecoran paduan aluminium (duralumin).

Tabel 4.7. Data material cair

Material	Titik Lebur [°C]	Panas laten solidifikasi (H _f) [kJ/kg]	Panas jenis (c) [kJ/kg-°C]	Viskositas (μ) [mPa-s]
Aluminum	660	396	1,05	1,3
Nickel	1453	297	0,73	4,01
Magnesium	650	384	1,38	1,04
Copper	1083	220	0,52	2,1
Gray cast iron	1251	211	0,34	5,25
Steel carbon 0,5%C	1540	272	0,99	-

Tabel 4.8. Data material solid (temperatur ruang)

Material	Panas jenis (c) [KJ/kg-°C]	Berat jenis (ρ) [kg/m ³]	Konduktivitas panas (k) [W/m-°C]	Diffusi (α) [m ² /s]
Sand	1,16	1500	0.60	3,45 x 10 ⁻⁷
Aluminum	0,90	2700	202	8,31 x 10 ⁻⁵
Nickel	0,44	8910	92	2,35 x 10 ⁻⁵
Magnesium	1,07	1700	156	8,58 x 10 ⁻⁵
Copper	0,39	8970	385	1,1 x 10 ⁻⁵
Gray cast iron	0,441	7125	42.7	1,3 x 10 ⁻⁵
Steel carbon 0,5%C	0,465	7883	54.0	1,17 x 10 ⁻⁵

Solidifikasi paduan aluminium merupakan proses yang kompleks karena interaksi yang terjadi secara bersamaan seperti; aliran panas, aliran fluida, dan aliran massa. Dalam perhitungan diasumsikan; tinggi penuangan dari *tap hole* ke lubang *pouring* 5 cm dan tinggi *pouring basin* 4,2 cm sehingga tinggi logam masuk ke lubang *getting system* 9,2 cm seperti dalam Gambar 4.22. Selanjutnya logam cair tersebut dialirkan ke *gating system*, masuk ke rongga *casting product* sampai mengisi *open riser* mengikuti persamaan energi yang menggambarkan kesetimbangan dalam tinggi jatuh untuk; elevasi (h), tekanan (P), kecepatan (V), dan rugi-rugi (L) seperti dalam pers. 4.1:

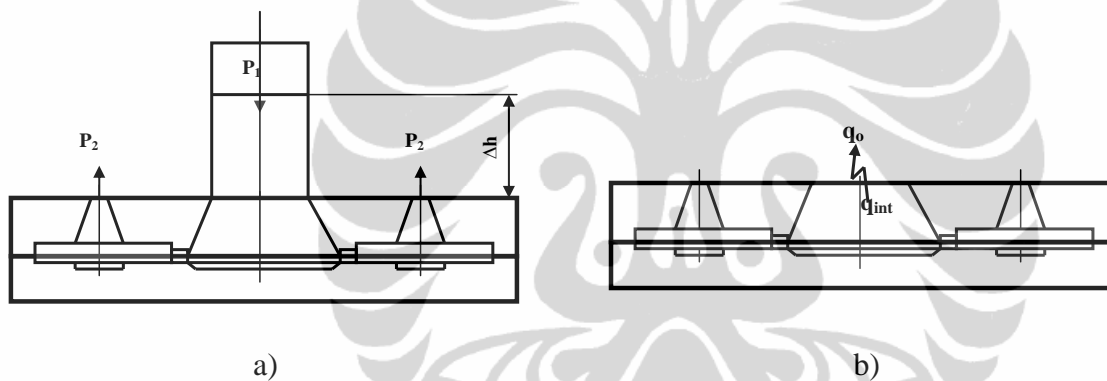
$$h + \frac{P}{\rho \cdot g} + \frac{V^2}{2 \cdot g} - L = c \quad (4.1)$$

Pada analitik ini tekanan pengecoran bervariasi dengan beda tekanan ruang *melting* dan ruang *solidification* sebesar $0,131 \text{ kg/cm}^2$ (10 cmHg) dan beda tinggi *pouring basin* dan bagian atas *riser* (h) 92 mm dengan mempertimbangkan gaya dorong dan impuls dari logam cair dan rugi-rugi diabaikan sehingga logam cair masuk ke rongga cetakan dengan kecepatan alir sebesar:

$$V = \sqrt{2\left(\frac{\Delta P}{\rho} + gh\right)} = \sqrt{2\left(\frac{1315,79}{2720} + 9,8 \times 0,092\right)}$$

$$V = 1,6654 \text{ m/s} \text{ atau } V = 16,654 \text{ dm/s.}$$

yang mana; ΔP , ρ , g , dan h masing-masing adalah perbedaan tekanan *pouring basin* dan *riser*, berat jenis duralumin, percepatan gravitasi, dan beda ketinggian logam *melt* dalam ruang lebur dan *riser*.

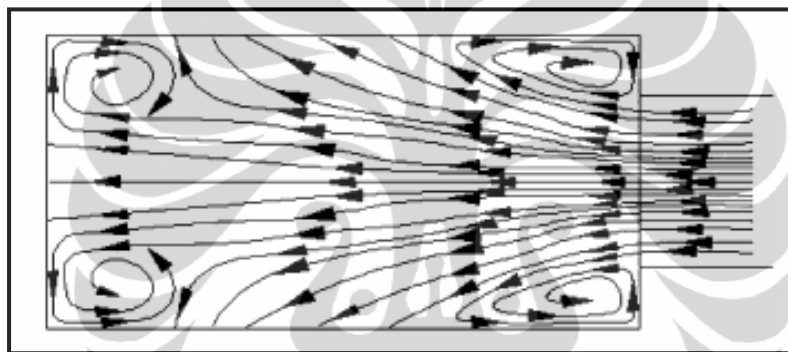


Gambar 4. 23. Sistem kesetimbangan dalam cetakan [77]
a). Kesetimbangan hidrodinamik, b). Kesetimbangan panas

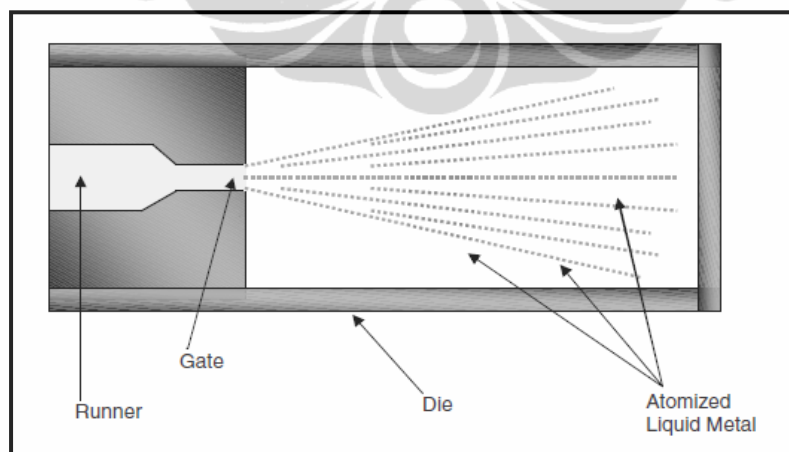
Keterangan Gb. 4.23. sistem kesetimbangan dalam cetakan permanen, yang mana P_1 , P_2 , Δh , q_o , q_{int} masing-masing menunjukkan tekanan pouring basin, tekanan *riser*, perbedaan tinggi logam cair, panas keluar dari logam padat, dan panas logam cair. Colas [72] menyatakan film oksida dapat masuk kedalam aluminium *melt* karena aliran turbulensi yang terjadi pada kecepatan alir mencapai nilai kritis ($0,5 \text{ m/detik}$ untuk aluminium paduan). Kriteria porositas karena olakan ditentukan oleh bilangan Reynolds. Pada fluida konvensional (air) bilangan $Re < 2100$ jenis aliran laminar, $Re \approx 2100-4000$ jenis aliran transisi, dan $Re > 4000$ jenis aliran turbulen. Dari rumus bilangan Reynolds diperoleh nilai sebesar :

$$Re = \frac{V \times D \times \gamma}{\nu} = \frac{1,6654 \times 0,04 \times 2720}{1,3 \times 10^{-2}} = 13938,12$$

Berdasarkan kriteria jenis aliran tersebut terjadi olakan atau turbulen seperti dalam Gambar 4.17. Teng dkk. [78]. Kecepatan alir logam cair mengisi rongga cetakan yang tinggi menyebabkan gas dan udara terperangkap dalam proses solidifikasi. Aliran turbulen ini menyebabkan gas terperangkap pada *casting product* yang mana bilangan $Re > 10000$, akibatnya terjadi porositas gas. Profil aliran turbulensi seperti tampak dalam Gambar 2.23. Nilai bilangan Reynolds untuk logam cair berbeda dengan air. Menurut Vinarcik [79] proses *die casting* vakum pada pengecoran paduan aluminium konvensional bilangan Reynolds dapat mencapai 27.000.000. Bilangan Reynolds yang sangat tinggi (ekstrim) tersebut karena dalam proses *die casting* vakum tersebut terjadi atomisasi logam seperti terlihat dalam Gambar 4.25.



Gambar 4.24. Skema aliran duralumin melt dalam *cavity* cetakan [25]



Gambar 2.25. Atomisasi dalam *die-casting* [79]

Kontrol utama dalam proses solidifikasi adalah bahan cetakan permanen yang berfungsi melepas panas dari logam cair ke sekeliling (atmosfer). Berdasarkan analisa

kesetimbangan panas seperti Gambar 4.22b. dan data sifat fisik seperti pada Tabel 4.7. dan Tabel 4.8. maka total waktu solidifikasi yang diperlukan untuk membekukan logam cair dalam rongga cetakan dapat dihitung berdasarkan waktu pengisian logam cair kedalam cetakan ditambah konstanta waktu pendinginan. Dari analisa geometri produk cor seperti Gambar 3.12. dihasilkan nilai-nilai fisik pengecoran yang dibutuhkan untuk memprediksi jenis porositas yang terjadi dalam pengecoran duralumin. Data fisik pengecoran tersebut tersusun seperti dalam Tabel 4.9.

Tabel 4.9. Dimensi spesimen *Casting Product*

No.	Produk [mm]		Hub [mm]		Riser [mm]		Volume [dm ³]	
	Diameter	Tebal	Diameter	Tinggi	Diameter	Tinggi	Produk	Cor
1	50	5	1,5	2,25	34	2	9,818	9,931
2	50	7,5	1,5	2,25	31,5	2	14,724	14,829
3	50	10	1,5	2,25	29	2	19,631	19,728
4	50	12,5	1,5	2,25	26,5	2	24,537	24,626
5	50	15	1,5	2,25	24	2	29,443	29,524
6	35*	38*	-	-	-	-	-	74,575
7	5**	10**	8**	-	-	-	-	0,400
Total							98,153	173,613

Keterangan ; * ukuran *pouring basin*, ** ukuran *gating system*

Waktu untuk mengisi rongga cetakan (t_1) dari persamaan kontinuitas;

$$Q = V \times 5 \times A \times t_1$$

yang mana Q : volume logam cair [liter], V : kecepatan logam cair [dm,s⁻¹], A : luas penampang [dm²], dan t_1 : waktu yang dibutuhkan [s], maka ;

$$t_1 = \frac{Q}{V \times 5 \times A} = \frac{98,155}{16,654 \times 5 \times 2 \times 0,785 \times 0,25 \times 0,1} = 3,015 \text{ detik}$$

Dan waktu pembekuan total (t) = waktu pengisian + 6,5 detik

$$= 3,02 + 6,5 = 9,52 \text{ detik}$$

Mengacu pada kriteria Niyama, $N = G / \sqrt{\dot{T}}$, yang mana G = gradien temperatur (temperatur tuang ke temperatur solidifikasi $(750 - 300) = 450$ °C) dan $\dot{T} = dT/dt$ = laju pendinginan, untuk Al dan paduannya menurut Zuo dkk. [80] korelasi bilangan Niyama (N) = 1200 - 3200 dan fraksi solid kritis mempunyai porositas didekat *chill* dan *top*.

$$\text{Laju pendinginan : } \frac{dT}{dt} = \frac{As}{\rho V C_p} \left[\frac{k \rho C_p}{t} \right]^{1/2} (T - T_o)$$

yang mana A_s : luas permukaan benda cor, k : konduktivitas benda cor, ρ : densitas benda cor, C_p : panas jenis benda cor. ρ' : densitas cetakan permanen, C_p' : panas jenis cetakan permanen.

$$\text{Maka, } \frac{dT}{dt} = \frac{0,0019625}{7883 \times 1,6654 \times 0,465} \left[\frac{202 \times 2720 \times 0,9}{13,02} \right]^{1/2} (450) = 0,028193$$

$$\text{Maka bilangan Niyama pengecoran, } N = G / \sqrt{dT/dt} = 292 / \sqrt{0,02819} = 1774$$

Dari analitik diatas, *shrinkage porosity* tidak terjadi pada *casting product* duralumin dalam pengecoran sistem vakum karena harga bilangan Niyama berada dalam rentang 1200 - 3200. Pada umumnya *shrinkage porosity* meningkat dengan berkurangnya nilai kriteria Niyama, Kent dkk. [28].

Pendekatan model tungku PSV dalam penelitian dengan *prototype* pada pengecoran sesungguhnya (kapasitas besar) dapat diperoleh dari persamaan *similarity* (kesebandingan) untuk menentukan waktu pevakuman. Dalam topik penelitian ini persamaan kesebandingan mengacu pada tekanan vakum sebagai dasar untuk mengontrol proses difusi gas hidrogen keluar dari duralumin melt sehingga porositas gas dapat direduksi. Faktor-faktor yang harus dipertimbangkan untuk membuat persamaan kesebandingan adalah; volume logam yang dilebur, luas permukaan kontak logam cair, temperatur peleburan.

BAB V

KESIMPULAN

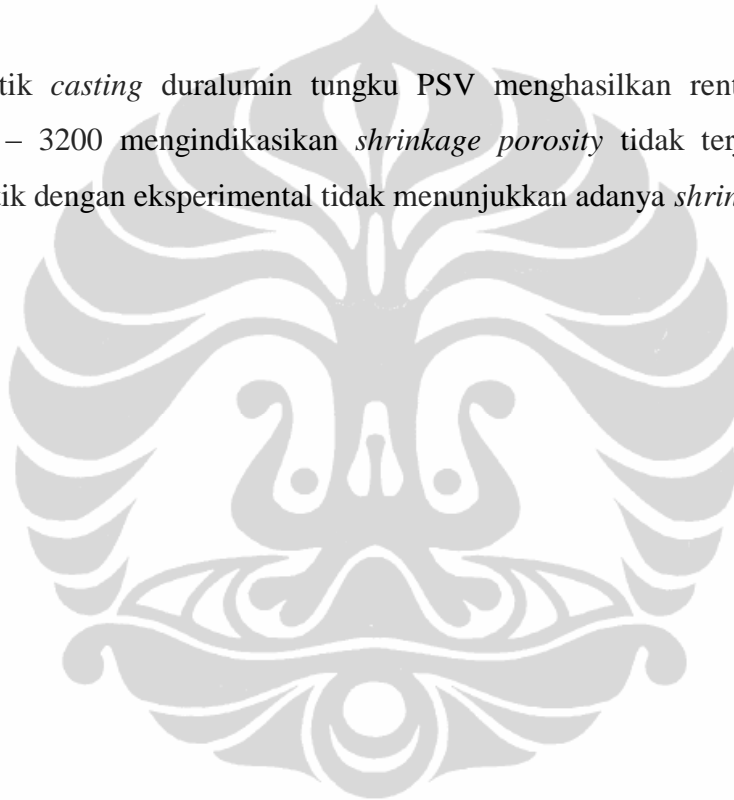
5.1. Kesimpulan

1. Hasil rancang bangun tungku pengecoran sistem vakum (PSV) mempunyai spesifikasi fisik panjang 60cm, lebar 40 cm, dan tinggi 100cm. Unjuk kerja tungku PSV dapat menghasilkan tekanan vakum dari 1kg/cm^2 sampai $0,263\text{kg/cm}^2$, laju pemanasan $8,95^\circ\text{C}/\text{menit}$ dengan kapasitas pengecoran 1 kg ingot duralumin. Proses pevakuman tungku PSV dimulai dari proses peleburan sampai proses solidifikasi dan perbedaan tekanan vakum *pouring basin* dengan ujung *riser* meningkatkan kecepatan *feeding*.
2. Simulasi Z-Cast tidak menunjukkan porositas pada produk cor (*wheel*), dan porositas (noktah merah) hanya terdapat pada dasar *riser* untuk ketebalan 12,5mm dan 15mm. Porositas tersebut terjadi di akhir solidifikasi, observasi makrokopis tidak menemukan porositas (gas dan *shrinkage*) pada permukaan cor.
3. Berat jenis duralumin teoritis dari kesetimbangan massa (γ_{teorisMB}) dan proses HIPing ($\gamma_{\text{teorisHIP}}$), berat jenis produk coran *as-cast* ($\gamma_{\text{as-Cast}}$) dan PSV (γ_{CastPSV}) semuanya berbanding lurus dengan penambahan tembaga. Harga $\gamma_{\text{teorisHIP}} > \gamma_{\text{teorisMB}}$ dan $\gamma_{\text{CastPSV}} > \gamma_{\text{as-Cast}}$. Yang mana masing-masing berat jenis tersebut adalah $\gamma_{\text{teorisHIP}}$ (2,98 – 3,49 g/cm^3), γ_{teorisMB} (2,56 – 2,89 g/cm^3), γ_{CastPSV} (2,59 – 2,66 g/cm^3), $\gamma_{\text{as-Cast}}$ (2,44 – 2,53 g/cm^3). Secara kuantitatif jumlah porositas duralumin yang ditentukan dengan $\gamma_{\text{teorisHIP}} > \gamma_{\text{teorisMB}}$ Yaitu (13,78% – 23,78%) lebih besar (-1,17% – 7,96%). Selain paduan utama (tembaga) dalam duralumin juga terdapat unsur-unsur lain dalam jumlah kecil (minor) seperti; Mn, Si, Mg, Zn, Fe, dan Sn. Unsur Fe dan Mn dalam paduan duralumin membentuk senyawa kompleks yang keras menyerupai jarum.
4. Berat jenis duralumin secara signifikan dipengaruhi derajat kevakuman tetapi kurang signifikan pengaruhnya dengan penambahan tembaga. $\gamma_{\text{TeorisHIP Al-3.0Cu}} < \text{Al-2.5Cu}$. Secara eksplisit tembaga dalam duralumin berpengaruh positif terhadap kenaikan berat jenis dan porositas gas.
5. Bertambahnya kevakuman menyebabkan porositas berkurang. Kenaikan kevakuman dari 1 kg/cm^2 sampai $0,263\text{ kg/cm}^2$ menyebabkan hidrogen larut turun dari 0,32

$\text{cm}^3/100\text{g}$ sampai $0,04 \text{ cm}^3/100\text{g}$ akibatnya porositas turun (22,22% menjadi 15,61%). Dan penambahan tembaga berkontribusi negatif terhadap porositas gas yaitu penambahan tembaga dari 2,5 %beratCu sampai 4,5%beratCu menyebabkan jumlah porositas bertambah dari 18,55% menjadi 24,2%.

6. Jumlah porositas *Casting product* duralumin PSV turun seiring bertambahnya ketebalan. Porositas duralumin dengan kandungan tembaga; 0%Cu porositas turun dari 12,84% sampai 2,07%, 2,5%Cu porositas turun dari 15,34% sampai 10,96%, 3,0%Cu porositas turun dari 15,78% sampai 10,98%, 3,5%Cu porositas turun dari 14,98% sampai 9,17%, 4,0%Cu porositas turun dari 15,44% sampai 12,02%, dan 4,5%Cu porositas turun dari 17,82% sampai 11,42%.
7. Semakin lambat laju solidifikasi bentuk mikrostrukturnya *globular* (bulat), besar, dan mengelompok. Solidifikasi semakin cepat mikrostrukturnya membentuk butiran *planar* atau *equiaxed*, kecil, dan terdistribusi lebih merata. Dan Semakin tinggi tingkat kevakuman porositasnya mengelompok pada bagian tepi, dan *hot spot*. Sedangkan tembaga menyebabkan porositas terdistribusi merata di seluruh bagian.
8. Penambahan tembaga menyebabkan struktur dendrit berubah, struktur Al-2.5Cu bentuknya lebih *globurated* dan *elongated*, coarse dari paduan Al-4.5Cu. Selain itu mikrostruktur dendrit (DAS) kecil terdistribusi dari *surface* ke *center*. Dendrit *as-cast* duralumin berbentuk *elongated* dan ketebalan bertambah ke arah pusat menyerupai *elongated-pancake* (oval). Tingkat kebulatan tersebut semakin besar dengan laju pendinginan lambat. PSV menghasilkan mikrostruktur *globular* dengan diameter butir bertambah besar ke arah pusat cor.
9. Perubahan bentuk dan butir mikrostruktur dari tekanan peleburan $0,263 \text{ kg/cm}^2$ ke tekanan $0,658 \text{ kg/cm}^2$ mengarah ke bentuk *globular* dan menjadi lebih besar. Dan porositasnya saling terpisah atau terdistribusi, bentuknya cenderung melingkar (mikro dan makro).
10. Tungku PSV menghasilkan fasa Al, Al_2Cu dan fasa inklusi senyawa ganda dan kompleks (Al_2O_3 , Al_4C_3 dan $\text{Al}_8\text{Si}_6\text{Mg}_3\text{Fe}$). Penambahan tembaga meningkatkan pembentukan fasa, aluminium (0%Cu) dan Al-2.5Cu jumlah fasanya lebih sedikit dari Al-3.0Cu, Al-3,5%Cu, Al-4,0%Cu, dan Al-4,5%Cu.

11. Tingkat kevakuman $0,658 \text{ kg/cm}^2$ ke $0,526 \text{ kg/cm}^2$ menurunkan jumlah fasa (sudut 2θ) dan intensitasnya, dan kevakuman tinggi ($0,263 \text{ kg/cm}^2$) jumlah fasa nonmetaliknya lebih kecil dan fasa tunggal $\alpha\text{-Al}$ lebih besar dari vakum rendah ($0,789 \text{ kg/cm}^2$). Tekanan $0,263 \text{ kg/cm}^2$ menghasilkan intensitas fasa tunggal $\alpha\text{-Al}$ tertinggi (1927\AA , sudut $2\theta 77,49^\circ$).
12. Ketebalan coran duralumin PSV menurunkan jumlah fasa inklusi (metalik dan non metalik), kecuali intensitas fasa inklusi pada tebal cor 10,0mm lebih rendah dari tebal cor 12,5mm.
13. Simulasi analitik *casting* duralumin tungku PSV menghasilkan rentang bilangan Niyama 1200 – 3200 mengindikasikan *shrinkage porosity* tidak terjadi. Validasi porositas analitik dengan eksperimental tidak menunjukkan adanya *shrinkage*.



DAFTAR REFERENSI

- [1] Subodh Das and Weimin Yin. 2007. Trends in the Global Aluminum Fabrication Industry. JOM.
- [2] Oleg Dzioubinski and Ralph Chipman. 1999. Trends in Consumption and Production: Selected Minerals, Department of Economic and Social Affairs, Division for Sustainable Development, Rm. DC2-2284. United Nations, New York.
- [3] Bambang Suharno. 2009. Pemberdayaan Industri Pengecoran Logam (*Metal Casting*) di Indonesia untuk Masa Depan. Pidato Pengukuhan Guru Besar, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.
- [4] P.D. Lee., J.D. Hunt. 1997. Hydrogen Porosity in Directional Solidified Aluminum-Copper Alloys: In Situ Observation. Acta mater Vol 45 No. 10, pp 155-4169, Elsevier Science Ltd.
- [5] Ian Polmear. 2006. Light Alloys: From traditional Alloys to Nanocrystals. Edition. Elsevier
- [6] Alcoa, Alloy 2024 Sheet and Plate, Excellent Fatigue Properties—Consistent Performance, ALCOA Mill Products, INC.
- [7] Bondan Tiara Sofyan. 2010. Penguasaan Teknologi Aluminium untuk Meningkatkan Daya Saing Bangsa. Pidato Pengukuhan Guru Besar, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.
- [8] J.R. Davis. 1994. Aluminum and Aluminum Alloys. ASM Specialty Handbook, ASM International, Materials Park, OH 440730002.
- [9] K.E. Lulay., K. Khan., and D. Chaaya. 2002. The Effect of Cryogenic Treatments on 7075 Aluminum Alloy. J. of Materials Engineering and Performance, 11(5) pp 479-480.
- [10] K. Sampath. 2009. Transverse-Weld Tensile Properties of a New Al-4Cu-2Si Alloy as Filler Metal. JMEPEG (2009) 18:1218–1225, DOI: 10.1007/s11665-009-9371-4, ASM International.
- [11] Marisa Di Sabatino and Lars Arnberg. 2009. Castability of aluminium alloys. Transactions of The Indian Institute of Metals, Vol. 62, Issues 4-5, August-October, pp. 321-325.
- [12] Ch. Pequet., M. Gremaud., and M. Rappaz. 2002. Modeling of Microporosity, Macroporosity, and Pipe-Shrinkage Formation During Solidification of Alloys Using a Mushy-Zone Refinement Method: Applications to Aluminum Alloys. Metallurgical and Materials Transactions A, Volume 33A, 2095-2106.
- [13] S.Suzuki., T-B Kim., H Nakajima. 2009. Fabrication of Al-Cu alloy with elongated pores by continuous casting technique, Journal of Physics: Conference Series 165, 012068 doi:10.1088/1742-6596/165/1/012068.
- [14] Park J S., Hyun S K., Suzuki S and Nakajima H. 2008. *Metal. Mater. Trans. A* accepted. Available from: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11661-008-9710-3>>.

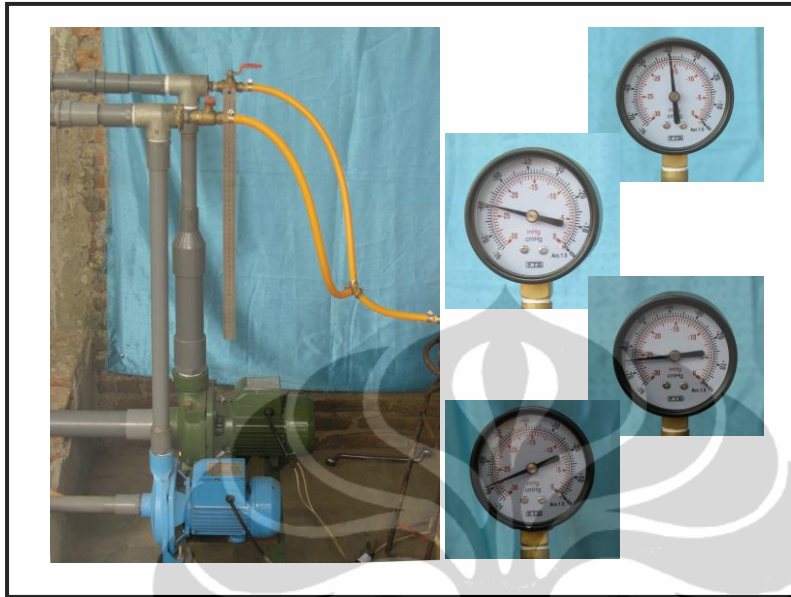
- [15] Winston Sequeira., Pikhovich., Vadim., Weiss., David. 2006. Finding New Strength in Aluminum : fuel efficiency-driven weight reduction issues in heavy-duty transportation have made high-strength aluminum alloy, such as A206, desirable to A356. *Modern Casting*. ProQuest Science Journal.
- [16] Qiming Chen and C. Ravindran. 2000. A Study of Thermal Parameters and Interdendritic Feeding in Lost Foam Casting. *JMEPEG* 9:386-395, ASM International.
- [17] Sug Won Kim and Hai Hao. 2003. Microstructure and Fatigue Characteristics of Direct Chill Cast and Electromagnetic Cast 2024 Al Alloy Ingots. *Metallurgical And Materials Transactions A*, Volume34A.
- [18] M. Pastor., H. Zhao., R.P. Martukanitz., T. Debroy. 1999. Porosity, Underfill and Magnesium Loss during Continuous Wave Nd:YAG Laser Welding of Thin Plates of Aluminum Alloys 5182 and 5754. Department of Materials Science and Engineering, The Pennsylvania State University, University Park, Pa., *Welding Research Supplement*.
- [19] Hongbin Yin., Jean N. Koster. 2000. In-Situ Observed Pore Formation During Solidification of Aluminum, *ISIJ International*, Vol 40, No. 4, pp.364-372.
- [20] Haizhi Ye. 2003. An Overview of the Development of Al-Si-Alloy Based Material for Engine Applications. *JMEPEG* 12:288-297, ©ASM International.
- [21] Bokhyun Kang., Yongsun Kim., Kiyoun Kim., Gueserb Cho., Kyeonghwan Choe., and Kyongwhoan Lee. 2007. Density and Mechanical Properties of Aluminum Lost Foam Casting by Pressurization during Solidification. *J. Mater. Sci. Technol.*, 23(6), 828-832.
- [22] Matthew Binney., Malt Dargusch., Mark Nave., Peter McKinney. 2003. Porosity Reduction in a High Pressure Die Casting Through the Use of Squeeze Pins, *Die Casting in the Heartland*. Indianapolis T03-065.
- [23] Y.M. Li., R.D. Li. 2001. Effect of the Casting Process Variables on Microporosity and Mechanical Properties in an Investment Cast Aluminum Alloy. *Sciences and Technology of Advanced Materials* 2, Elsevier.
- [24] C. Meric. 2000. An Investigation on the Elastic Modulus and Density of Vacuum Casted Aluminum Alloy 2024 Containing Lithium Additions. *J. of Materials Engineering and Performance* 9(3), 266-271.
- [25] M. Xiong and A.V. Kuznstsov. 2001. Comparison between Lever and Scheil Rules for Modeling of Microporosity Formation during Solidification, *Flow, Turbulence and Combustion* 67: 305–323, © 2002 Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands.
- [26] TU-Wien. 2002. Development of Al-Si-Mg Alloys for Semi-Solid Processing and Silicon Spheroidization Treatment (SST) for Al-Si Cast Alloys. A dissertation submitted for the degree of Doctor of Technical Sciences, Swiss Federal Institute of Technology Zurich.
- [27] D.G. Eskin., V.I. Savran., L. Katgerman. 2005. Decomposition of Supersaturated Solid Solutions in Al–Cu–Mg–Si Alloys. *Journal of Materials Science* 38, 279–290.

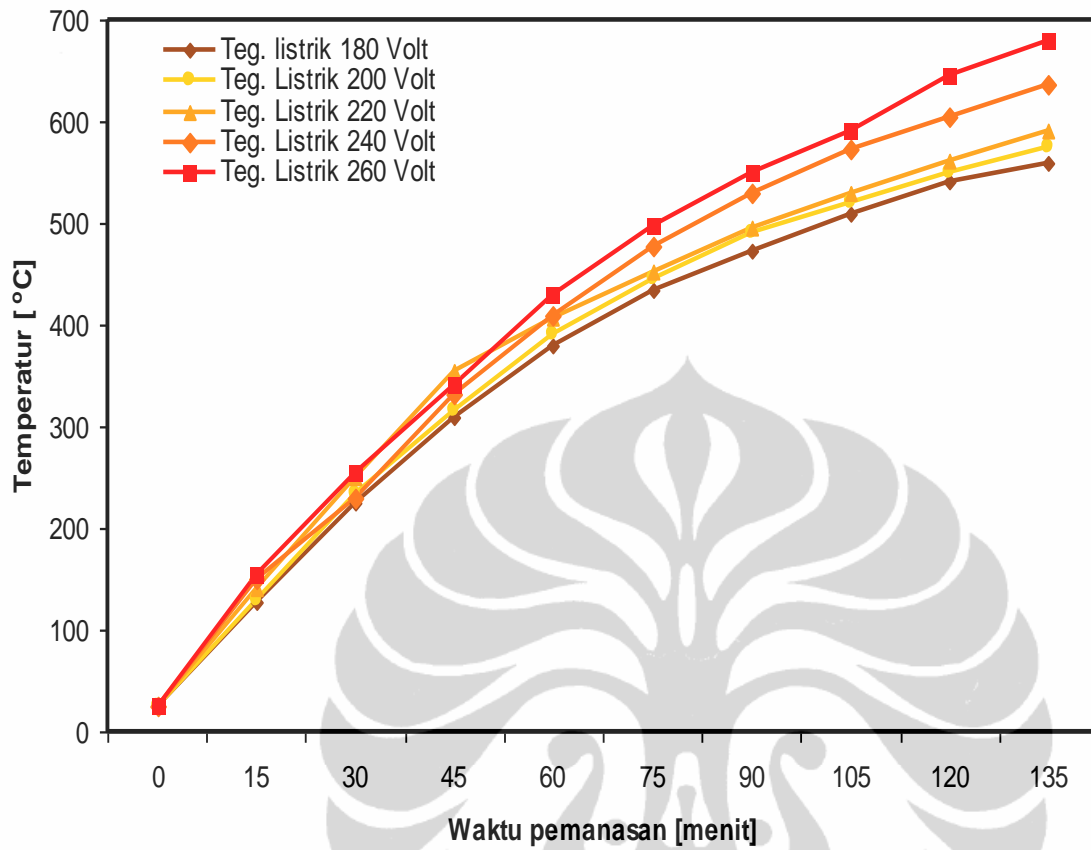
- [28] Kent D. Carlson, Zhiping Lin, and Christoph Bekermann . 2007. Modeling the Effect of Finite-Rate Hydrogen Diffusion on Porosity Formation in Aluminum Alloys. The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International, Metallurgical and Materials Transactions B, Volume 38B.
- [29] Jean-Lucc Battaglia., Jose Manuel Rozot. 2005. A Predictive Model for the Microporosity Quantitative in Al-Si Alloy. Expert from the Proceedings of the Comsol Multiphysics User's Conference, Paris.
- [30] M. L. N. M. Melo., E. M. S. Rizzo., R. G. Santos. 2005. Predicting dendrite arm spacing and their effect on microporosity formation in directionally solidified Al-Cu alloy, Journal of Materials Science 40. 1599 – 1609.
- [31] Manash Dash., Makhlof Makhlof. 2001. Effect of key Alloying Elements on the Feeding Characteristics of Aluminum-Silicon Casting Alloys, J. of Light Metals 1 pp 251-265.
- [32] Rafael Colas. 2003. Handbook of Aluminum Volume 2 Alloy Production and Materials Manufacturing; Castings, Copyright © 2003 Marcel Dekker, Inc.
- [33] LA. Dobrzanski., R. Maniara., J.H. Sokolowski. 2006. The Effect of Cast Al-Si-Cu Alloy Solidification Rate on Alloy Thermal Characteristics. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Vol. 17 Issue 1-2.
- [34] B. Ravi. 2003. Troubleshooting and Optimization of Aluminum Alloy Casting: Myths and Bottlenecks. Technical Presentation at National Conference on Aluminum Casting, ALUCAST Pune, December 4-6.
- [35] Niko Rozman., Tonica Bonina., Ivan An`el., Franc Zupani. 2008. The Influence of Cooling Rate on The Microstructure of an Al-Mn-Be Alloy. Materiali in tehnologije / Materials and technology 42 . 2.
- [36] Enrique J. Lavernia., T. S. Srivatsan. 2010. The rapid solidification processing of materials: science, principles, technology, advances, and applications, J Mater Sci 45:287–325 DOI 10.1007/s10853-009-3995-5.
- [37] John Ancsin. 2008. Manipulating the Melting Behavior of Metal–Metal Eutectics. Int J Thermophys 29:181–189, DOI 10.1007/s10765-007-0307-7
- [38] Murat Tiryakioglu, James T. Staley., Handbook of Aluminum Volume 1, Physical Metallurgy and Processes; Physical Metallurgy and the Effect of Alloying Additions in Aluminum Alloy, Copyright © 2003 Marcel Dekker, Inc.
- [39] Paola Bassani., E. Gariboldi., and D. Ripamonti. 2008. Thermal Analysis of Al–Cu–Mg–Si Alloy with Ag/Zr Additions. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 91, 1, 29–35.
- [40] V. Raghavan. 2007. Phase Diagram Evaluations: Section II : Al-Cu-Zn (Aluminum-Copper-Zinc). JPEDAV 28:183–188, DOI: 10.1007/s11669-007-9025-x 1547-7037 © ASM International.
- [41] V. A. Zhorin., V. A. Zhorin., M. R. Kiselev., L. L. Mukhina., T. P. Puryaeva and I. V. Razumovskaya. 2008. X-ray Diffraction and Calorimetric Study of Al–Cu Mixtures Subjected to Plastic Deformation under High Pressure. ISSN 1990-7931, Russian Journal of Physical Chemistry B, Vol. 2, No. 1, pp. 32–38. © Pleiades Publishing, Ltd.

- [42] Niraj Nayan., Govind K., Suseelan Nair., M.C. Mittal., K.N Sudhakaran. 2007. Studies on Al-Cu-Li-Mg-Ag-Zr Alloy through Vacuum Induction Melting (VIM) Technique. *Materials Science and Engineering* 500-5007. Elsevier.
- [43] P.S.Chen., A.K. Kuruvilla., T.W. Malone., and W.P. Stanton. 1998. The Effects of Artificial Aging an the Microstructure and Fracture Toughness of Al-Cu-Li Alloy 2195. *Journal of Material Engineering and Performance*. JMEPEG 7:682-690, ASM International.
- [44] Soon Ho Kim., Seok Swoo Cho., and Jung-Hyen Park. 2002. Prediction of Fatigue Life in 2024-T3 Aluminum Using X-ray Half-Value Breadth. *International Journal of Korean Society of Precision Engineering*, Vol 3, No. 2.
- [45] Joao Carillos Ribeiro Placido., Paulo Emilio Valodao de Miranda., Theodoro Antoun Netto., Ilson Paranhos Pasqualino., Guilherme Farias Miscow., Bianca de Carvalho Pinheiro. 2005. Fatigue Analysis of Aluminum Drill Pipes. *Materials Research*, Vol 8, No. 4, 409-415.
- [46] J.Campbell. 1991. *Castings*, Butterworth-Heinemann Ltd, Oxford.
- [47] BY M. Pastor., H. Zhao., R. P. Martukanitz and T. Debroy. 1999. Porosity, Underfill and Magnesium Loss during Continuous Wave Nd:YAG Laser Welding of Thin Plates of Aluminum Alloys 5182 and 5754, *Welding Research Supplement*
- [48] Serope Kalpakjian., Steven Schmid. 2006. *Manufacturing Engineering and Technology*. Fifth Edition in SI Unit, Published by Prentice Hall, Pearson Education South Asia Pte Ltd, Singapore.
- [49] John L. Jorstad., Wayne M. Rasmussen. 2001. *Aluminum Casting Technology*. 2nd Edition, American Foundry Society, Des Plaines, Illinois.
- [50] Jean-Lucc Battaglia., Jose Manual Rozot. 2005. A Predictive Model for the Micro-porosity Quatitative in Al-Si Alloy. A Expert from tha Preceedings of the Comsol Multiphysics User's Conference, Paris.
- [51] Whitttenberger dan Rhines, 1952
- [52] Ryotatsu Otsuka. 2003. *Handbook of Aluminum Volume 1 Physical Metallurgy and Processes; Molten Metal Processing*. Copyright © 2003 Marcel Dekker, Inc.
- [53] G.K. Sigworth 1987. *ASF Trans*, 95. p.73
- [54] R. Otsuka and S. Tanimoto. 1991. Hydrogen concentration dependence of molten pure aluminum on water vapor pressure of ambient atmosphere. *Science and Engineering of Light Metals, RASELM-'91*, Japan. Inst. Light Metals, pp. 1023^1028.
- [55] <http://outgoing.finitesolutions.com/SOLIDCastWorkbook/Unit%2045.pdf>
- [56] Wahyono Suprpto., Bambang Suharno., Johny Wahyuadi Sudarsono., Dedi Priadi. 2011. Effect of Copper and Air Blocking on Porosity Defect of Duralumin Cast. *Internat. J. Materials Enginneering and Technology* 5 (1) (2011), 61-75
- [57] L.A. Dobrzanski , M. Krupinski, R. Maniara, J.H. Sokolowski. Computer Aided Method for Quality Control of Automotive Al-Si-Cu Cast Components. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Volume 24 Issue 2 October 2007.

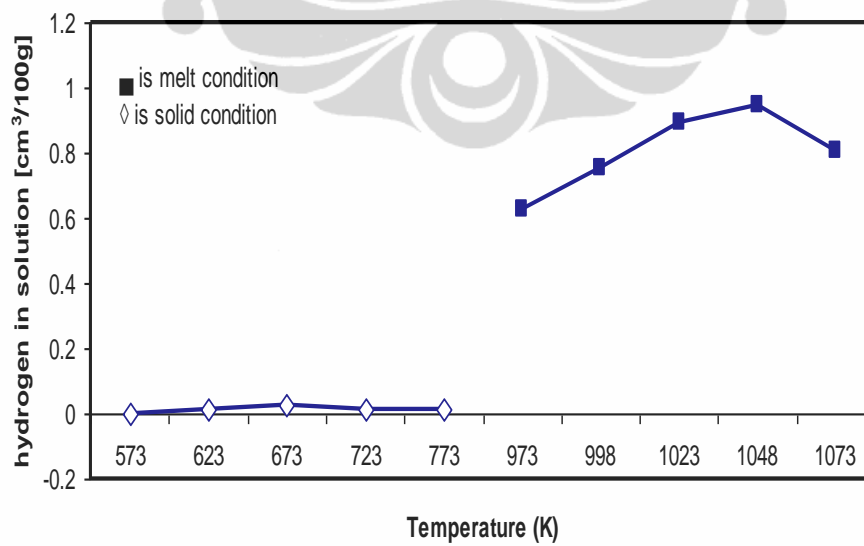
- [58] H. Kaya, E. Cadırlı, and M. Gunduz, Dendritic Growth in an Aluminum-Silicon Alloy, *JMEPEG* (2007) 16:12–21.
- [59] Sergio Gallo, Claudio Mus, Stefano P Barone,; 2001, Eliminate Aluminum Casting Porosity, Shrinkage Via Liquid HIPping, *Modern Casting*, ProQuest Science Journal.
- [60] Z. Li., A. M. Samuel., F. H. Samuel., C. Ravindran., and S. Valtierra. 2003. Effect of alloying elements on the segregation and dissolution of CuAl₂ phase in Al-Si-Cu 319 alloys. *JOM Science* 38 : 1203 – 1218.
- [61] TechnicalToolkit, Alloying Element Characteristics, www.metallurg.com
- [62] John Campbell's. 2005. Ten Rules for Making Reliable Castings, *Journal of Metals*.
- [63] Robert P. Taylor., Stephen T. McClain. 1998. Uncertainty Analysis of Metal-Casting Porosity Measurements Using Archimedes Principle. *Materials and Mechanics Laboratory. Department of Mechanical Engineering, Mississippi State University.*
- [64] Ming Zhou., Henry Hu., Naiyi Li., and Jason Lo. 2005. Microstructure and Tensile Properties of Squeeze Cast Magnesium Alloy AM50. *JMEPEG* 14:539-545, DOI: 10.1361/105994905X56151, ©ASM International.
- [65] K. Y. Sastry., L. Froyen., J. Vleugels., E. H. Bentefour., and C. Glorieux. 2004. Effect of Porosity on Thermal Conductivity of Al-Si-Fe-X Alloy Powder Compacts1. *International Journal of Thermophysics*, Vol. 25, No. 5.
- [66] Peng Yu, M. Yan, G.B. Schffer, and MA Qian. 2011. Fabrication of Porous Aluminum with Controllable Open-Pore Fraction, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Volume 42A, July.
- [67] F. Bonollo, J. Urban, B. Bonatto, M. Botter. 2005. Gravity and low pressure die casting of aluminium alloys: a technical and economical benchmark, *la metallurgia italiana*.
- [68] M.A. Talamantes-Silva., A. Radrigues., J. Talamantes-Silva., S. Valtierra., Rafael Colas. 2008. Zharacterization of an Al-Cu Alloy, *Material Characterization* 59. Elsevier.
- [69] Metal Casting Design, Using HIP to Improve Aluminum Castings, *Proceeding at the AFS International Conference on High Integrity Light Metal Castings*, Oct. 31-Nov.1, 2005, Indianapolis, 2010.
- [70] Wahyono Suprpto., Bambang Suharno., Johny Wahyuadi Sudarsono., Dedi Priadi. 2009. Comparison of Porosity Defects on Duralumin Produced with Permanent Mold at Conditioned Atmosphere and Vacuum Castings. Presented of The 11th International Conference on QIR, 3-6 August, University of Indonesia.
- [71] S.X. Girard., H.N. Azari., and D.S. Wilkinson. 2004. Effect of Thermomechanical Processing on Grain Structure Development in a Twin-Belt Strip Cast Automotive Aluminum Alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*, Volume 35A.
- [72] Rafael Colas. *Handbook of Aluminum Volume 1, Physical Metallurgy and Precesses; Casting*. Copyright © 2003 Marcel Dekker, Inc.

- [73] G. Garcia-Garsia., J. Espinoza-Cuadra., H. Mancha-Molinar. 2007. Copper Content and Cooling Rate Effects Over Second Phase Particles Behavior in Industrial Aluminum-Silicon Alloy 319. *Materials and Design* 28 pp428-433, Elsevier
- [74] Galina Kasperovich., Thomas Volkmann., Lorenz Ratke., and Dieterherlack. 2008. Microsegregation during Solidification of an Al-Cu Binary Alloy at Largely Different Cooling Rates (0.01 to 20,000 K/s): Modeling and Experimental Study. *Metallurgical And Materials Transactions A*, Vol. 39A.
- [75] Tanya L. Giles., Keiichiro Oh-Ishi., Alexander P. Zhilyaev., Srinivasan Swaminathan., Murray W. Mahoney., and Terry R. MC. Nelley. 2009. The Effect of Friction Stir Processing on the Microstructure and Mechanical Properties of an Aluminum Lithium Alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*, Volume 40A.
- [76] J.T. Staley. 1975. Microstructure and Toughness of High Strength Alloy, Presented at ASTM Symposium on Properties Related to Toughness. Montreal, Canada, 22-27 June.
- [77] Wahyono Suprpto., Bambang Suharno., Johnny Wahyuadi Soedarsono., Dedi Priadi. 2011. Analytical and Experimental Models of Porosity Formation of Duralumin Cast in Vacuum Casting System. Accepted in *Advanced Materials Research (AMR) Journal*, 28th March.
- [78] Haitao Teng, Tingju Li, Xiaoli Zhang, Fudong Bai and Kai Qi. 2009. Mold-filling characteristics and solidification behavior of magnesium alloy in vacuum suction casting process . *Journal of Materials Science* Volume 44, Number 20, 5644-5653, DOI: 10.1007/s10853-009-3795-y.
- [79] Edward J. Vinarcik, *High Integrity Die Casting Processes*, Copyright © 2003 by John Wiley & Sons, New York.
- [80] Y. Zuo., H. Li., M. Xia., B. Jiang., G. M. Scamans., Z. Fan. 2011. Refining grain structure and porosity of an aluminium alloy with intensive melt shearing. *Scripta Materialia* 64 pp209–212.

KARAKTERISTIK TUNGKU PSV**Gambar 1.** Tekanan proses *vacuuming***Gambar 2.** Temperatur operasi tungku PSV



Gambar 3. Laju pemanasan tungku PSV



Gambar 4. Estimasi kelarutan hidrogen dalam aluminium

Pengukuran Berat Jenis As-cast Duralumin

Tabel 4.1. Data hasil pengujian Piknometry							
Tebal	Cu 0.0%	Densitas teoritis 2.707					
mm	W di udara	W _{awal}	W _{akhir}	Bucket + S	Bucket	Densitas	Porositas
5	28.98	228.59	210.3	18.29	3.88	1.989019	23.73395
	28.99	228.59	208.47	20.12	3.88	2.273725	12.81727
	27.66	228.59	209.35	19.24	3.88	2.24878	13.77375
Average	28.54333333	228.59	209.3733333	19.2166667	3.88	2.161282	17.12875
7.5	38.27	228.59	201.21	27.38	3.88	2.591063	0.649426
	37.96	228.59	202.52	26.07	3.88	2.407102	7.703141
	37.78	228.59	203.85	24.74	3.88	2.232861	14.38418
Average	38.00333333	228.59	202.526667	26.06333333	3.88	2.402233	7.889821
10	48.73	228.59	195.19	33.4	3.88	2.5367	2.73391
	48.41	228.59	195.98	32.61	3.88	2.459858	5.680302
	47.53	228.59	196.15	32.44	3.88	2.505535	3.928871
Average	48.22333333	228.59	195.7733333	32.8166667	3.88	2.500346	4.12785
12.5	56.37	228.59	190.86	37.73	3.88	2.503108	4.021919
	56.5	228.59	191.15	37.44	3.88	2.462947	5.561855
	53.84	228.59	192.31	36.28	3.88	2.511194	3.711885
Average	55.57	228.59	191.44	37.15	3.88	2.491928	4.450604
15	70.77	228.59	181.77	46.82	3.88	2.542939	2.49466
	67.65	228.59	184.36	44.23	3.88	2.478022	4.98382
	67.33	228.59	183.63	44.96	3.88	2.564952	1.650599
Average	68.58333333	228.59	183.2533333	45.3366667	3.88	2.528262	3.057421
Replikasi							
5	28.99	228.59	208.55	20.04	3.88	2.304739	11.62811
	28.99	228.59	208.07	20.52	3.88	2.394316	8.193413
	27.64	228.59	208.51	20.08	3.88	2.464406	5.50592
Average	28.54	228.59	208.376667	20.21333333	3.88	2.384828	8.55721
7.5	38.26	228.59	202.83	25.76	3.88	2.382491	8.646824
	37.97	228.59	202.71	25.88	3.88	2.425135	7.011709
	37.78	228.59	202.49	26.1	3.88	2.476581	5.039073
Average	38.00333333	228.59	202.676667	25.91333333	3.88	2.427264	6.930076
10	48.74	228.59	195.45	33.14	3.88	2.552094	2.143617
	48.4	228.59	196.29	32.3	3.88	2.470871	5.258019
	47.52	228.59	196.13	32.46	3.88	2.559155	1.872882
Average	48.22	228.59	195.956667	32.63333333	3.88	2.526596	3.121323
12.5	56.35	228.59	190.99	37.6	3.88	2.539859	2.612784
	56.49	228.59	190.73	37.86	3.88	2.559742	1.850371
	53.83	228.59	193.31	35.28	3.88	2.447909	6.138457
Average	55.5566667	228.59	191.676667	36.91333333	3.88	2.51596	3.529151
15	70.76	228.59	181.91	46.68	3.88	2.581373	1.020959
	67.65	228.59	183.98	44.61	3.88	2.563262	1.715433
	67.33	228.59	183.85	44.74	3.88	2.594507	0.51737
Average	68.58	228.59	183.246667	45.34333333	3.88	2.579653	1.086911

Lanjutan

Tebal mm	Cu 2.5% Densitas teoritis 2.892						
	W di udara	W _{awal}	W _{akhir}	Bucket + S	Bucket	Densitas	Porositas
5	28.32	228.59	207.84	20.75	3.88	2.473362	10.67669
	28.55	228.59	208.06	20.53	3.88	2.39916	13.35646
	29.07	228.59	206.97	21.62	3.88	2.565755	7.340028
Average	28.6466667	228.59	207.6233	20.9666667	3.88	2.478085	10.50613
7.5	38.33	228.59	201.59	27	3.88	2.520053	8.990517
	38.07	228.59	202.61	25.98	3.88	2.383845	13.90954
	38.82	228.59	202.04	26.55	3.88	2.403715	13.19194
Average	38.4066667	228.59	202.08	26.51	3.88	2.434397	12.0839
10	49.44	228.59	196.01	32.58	3.88	2.383799	13.91118
	48.7	228.59	196.1	32.49	3.88	2.424092	12.45606
	49.93	228.59	194.31	34.28	3.88	2.55658	7.671375
Average	49.3566667	228.59	195.4733	33.1166667	3.88	2.453115	11.40792
12.5	58.38	228.59	188.99	39.6	3.88	2.576346	6.95753
	58.15	228.59	189.44	39.15	3.88	2.541521	8.215205
	57.72	228.59	190.43	38.16	3.88	2.462457	11.07052
Average	58.0833333	228.59	189.62	38.97	3.88	2.526095	8.772318
15	69.99	228.59	182.31	46.28	3.88	2.536789	8.386107
	69.39	228.59	182.8	45.79	3.88	2.525109	8.807903
	69.3	228.59	182.98	45.61	3.88	2.513602	9.223484
Average	69.56	228.59	182.6967	45.8933333	3.88	2.525169	8.805727
Replikasi							
5	28.32	228.59	208.72	19.87	3.88	2.296837	17.05175
	28.55	228.59	208.81	19.78	3.88	2.256917	18.49343
	29.07	228.59	209.54	19.05	3.88	2.091367	24.47212
Average	28.6466667	228.59	209.0233	19.5666667	3.88	2.210391	20.17367
7.5	38.33	228.59	202.73	25.86	3.88	2.344343	15.33613
	38.07	228.59	203.3	25.29	3.88	2.285114	17.47512
	38.82	228.59	202.21	26.38	3.88	2.378676	14.09619
Average	38.4066667	228.59	202.7467	25.8433333	3.88	2.335698	15.64831
10	49.44	228.59	195.68	32.91	3.88	2.422342	12.51925
	48.7	228.59	192.9	35.69	3.88	2.883363	-4.13012
	49.93	228.59	194.44	34.15	3.88	2.539674	8.28189
Average	49.3566667	228.59	194.34	34.25	3.88	2.599544	6.119771
12.5	58.38	228.59	189.54	39.05	3.88	2.515295	9.162328
	58.15	228.59	189.82	38.77	3.88	2.5	9.714698
	57.72	228.59	190.12	38.47	3.88	2.49546	9.878641
Average	58.0833333	228.59	189.8267	38.7633333	3.88	2.503592	9.584978
15	69.99	228.59	182.45	46.14	3.88	2.523981	8.848637
	69.39	228.59	182.77	45.82	3.88	2.527869	8.708239
	69.3	228.59	183.16	45.43	3.88	2.497297	9.812304
Average	69.56	228.59	182.7933	45.7966667	3.88	2.516339	9.124627

Lanjutan

Tebal	Cu 3.0%	Densitas teoritis 2.936					
mm	W di udara	W_{awal}	W_{akhir}	Bucket +S	Bucket	Densitas	Porositas
5	28.53	228.59	206.4	22.19	3.88	2.791585	0.549158
	28.66	228.59	207.71	20.88	3.88	2.457976	12.43406
	28.93	228.59	207.69	20.9	3.88	2.429051	13.46451
Average	28.7066667	228.59	207.2667	21.323333	3.88	2.548683	9.202599
7.5	38.22	228.59	202.3	26.29	3.88	2.417457	13.87755
	38.33	228.59	201.22	27.37	3.88	2.582884	7.984179
	38.28	228.59	201.53	27.06	3.88	2.535099	9.686522
Average	38.2766667	228.59	201.6833	26.906667	3.88	2.509945	10.58264
10	48.25	228.59	195.81	32.78	3.88	2.49354	11.16708
	48.63	228.59	195.2	33.39	3.88	2.54341	9.390451
	49.11	228.59	194.81	33.78	3.88	2.556481	8.924795
Average	48.6633333	228.59	195.2733	33.316667	3.88	2.531033	9.831376
12.5	55.03	228.59	190.79	37.8	3.88	2.606821	7.131407
	56.86	228.59	190.9	37.69	3.88	2.466811	12.1193
	56.75	228.59	190.15	38.44	3.88	2.557458	8.889978
Average	56.2133333	228.59	190.6133	37.976667	3.88	2.541673	9.452335
15	69.99	228.59	183.53	45.06	3.88	2.429365	13.45334
	68.18	228.59	182.15	46.44	3.88	2.661202	5.19408
	68.41	228.59	182.7	45.89	3.88	2.591288	7.684792
Average	68.86	228.59	182.7933	45.796667	3.88	2.555734	8.951398
Replikasi							
5	28.53	228.59	209	19.59	3.88	2.225429	20.7186
	28.66	228.59	209.46	19.13	3.88	2.137211	23.86138
	28.93	228.59	209.06	19.53	3.88	2.178464	22.39174
Average	28.7066667	228.59	209.1733	19.416667	3.88	2.179701	22.34765
7.5	38.22	228.59	202.98	25.61	3.88	2.317768	17.42899
	38.33	228.59	202.59	26	3.88	2.36459	15.76096
	38.28	228.59	202.31	26.28	3.88	2.410579	14.12257
Average	38.2766667	228.59	202.6267	25.963333	3.88	2.36373	15.79159
10	48.25	228.59	196.32	32.27	3.88	2.429507	13.44829
	48.63	228.59	195.95	32.64	3.88	2.447408	12.81054
	49.11	228.59	196.75	31.84	3.88	2.321986	17.27874
Average	48.6633333	228.59	196.34	32.25	3.88	2.397996	14.57086
12.5	55.03	228.59	192.44	36.15	3.88	2.417838	13.86397
	56.86	228.59	191.88	36.71	3.88	2.366209	15.70328
	56.75	228.59	191.97	36.62	3.88	2.363599	15.79628
Average	56.2133333	228.59	192.0967	36.493333	3.88	2.381921	15.14354
15	69.99	228.59	184.81	43.78	3.88	2.326022	17.13495
	68.18	228.59	183.94	44.65	3.88	2.487413	11.38535
	68.41	228.59	183.41	45.18	3.88	2.523423	10.10249
Average	68.86	228.59	184.0533	44.536667	3.88	2.441555	13.01905

Lanjutan

Tebal mm	Cu 3.5% W di udara	Densitas teoritis 2.926					
		W _{awal}	W _{akhir}	Bucket +S	Bucket	Densitas	Porositas
5	28.73	228.59	208.29	20.3	3.88	2.333875	16.49821
	29.25	228.59	208	20.59	3.88	2.332536	16.54612
	28.75	228.59	207.51	21.08	3.88	2.489177	10.94177
Average	28.91	228.59	207.9333	20.656667	3.88	2.382692	14.75162
7.5	38.24	228.59	202.45	26.14	3.88	2.392991	14.38314
	38.72	228.59	201.53	27.06	3.88	2.491634	10.85386
	40.32	228.59	200.52	28.07	3.88	2.49969	10.56565
Average	39.093333	228.59	201.5	27.09	3.88	2.46128	11.93989
10	48.93	228.59	195.86	32.73	3.88	2.436753	12.81742
	49.33	228.59	195.06	33.53	3.88	2.506606	10.31822
	51.77	228.59	193.64	34.95	3.88	2.500966	10.51999
Average	50.01	228.59	194.8533	33.736667	3.88	2.481475	11.21734
12.5	56.02	228.59	190.9	37.69	3.88	2.522287	9.757164
	56.71	228.59	190.45	38.14	3.88	2.526058	9.622257
	57.53	228.59	189.52	39.07	3.88	2.575201	7.863992
Average	56.753333	228.59	190.29	38.3	3.88	2.541194	9.080714
15	68.12	228.59	183.21	45.38	3.88	2.558978	8.444429
	68.98	228.59	182.16	46.43	3.88	2.609913	6.622076
	70.6	228.59	180.93	47.66	3.88	2.632364	5.818823
Average	69.233333	228.59	182.1	46.49	3.88	2.600476	6.959722
Replikasi							
5	28.73	228.59	207.58	21.01	3.88	2.476724	11.38733
	29.25	228.59	208.15	20.44	3.88	2.304965	17.53257
	28.75	228.59	208.27	20.32	3.88	2.3355	16.44009
Average	28.91	228.59	208	20.59	3.88	2.369672	15.21746
7.5	38.24	228.59	202.78	25.81	3.88	2.344574	16.11542
	38.72	228.59	201.6	26.99	3.88	2.480461	11.25362
	40.32	228.59	201.33	27.26	3.88	2.380165	14.84203
Average	39.093333	228.59	201.9033	26.686667	3.88	2.400327	14.12066
10	48.93	228.59	195.96	32.63	3.88	2.424678	13.24945
	49.33	228.59	196.19	32.4	3.88	2.370495	15.18802
	51.77	228.59	194.64	33.95	3.88	2.385714	14.6435
Average	50.01	228.59	195.5967	32.993333	3.88	2.393205	14.3755
12.5	56.02	228.59	192.18	36.41	3.88	2.384845	14.67461
	56.71	228.59	191.46	37.13	3.88	2.417306	13.5132
	57.53	228.59	190.03	38.56	3.88	2.517724	9.920419
Average	56.753333	228.59	191.2233	37.366667	3.88	2.439255	12.72791
15	68.12	228.59	183.51	45.08	3.88	2.530461	9.464736
	68.98	228.59	183.28	45.31	3.88	2.503811	10.4182
	70.6	228.59	183.49	45.1	3.88	2.402995	14.02522
Average	69.233333	228.59	183.4267	45.163333	3.88	2.477042	11.37594

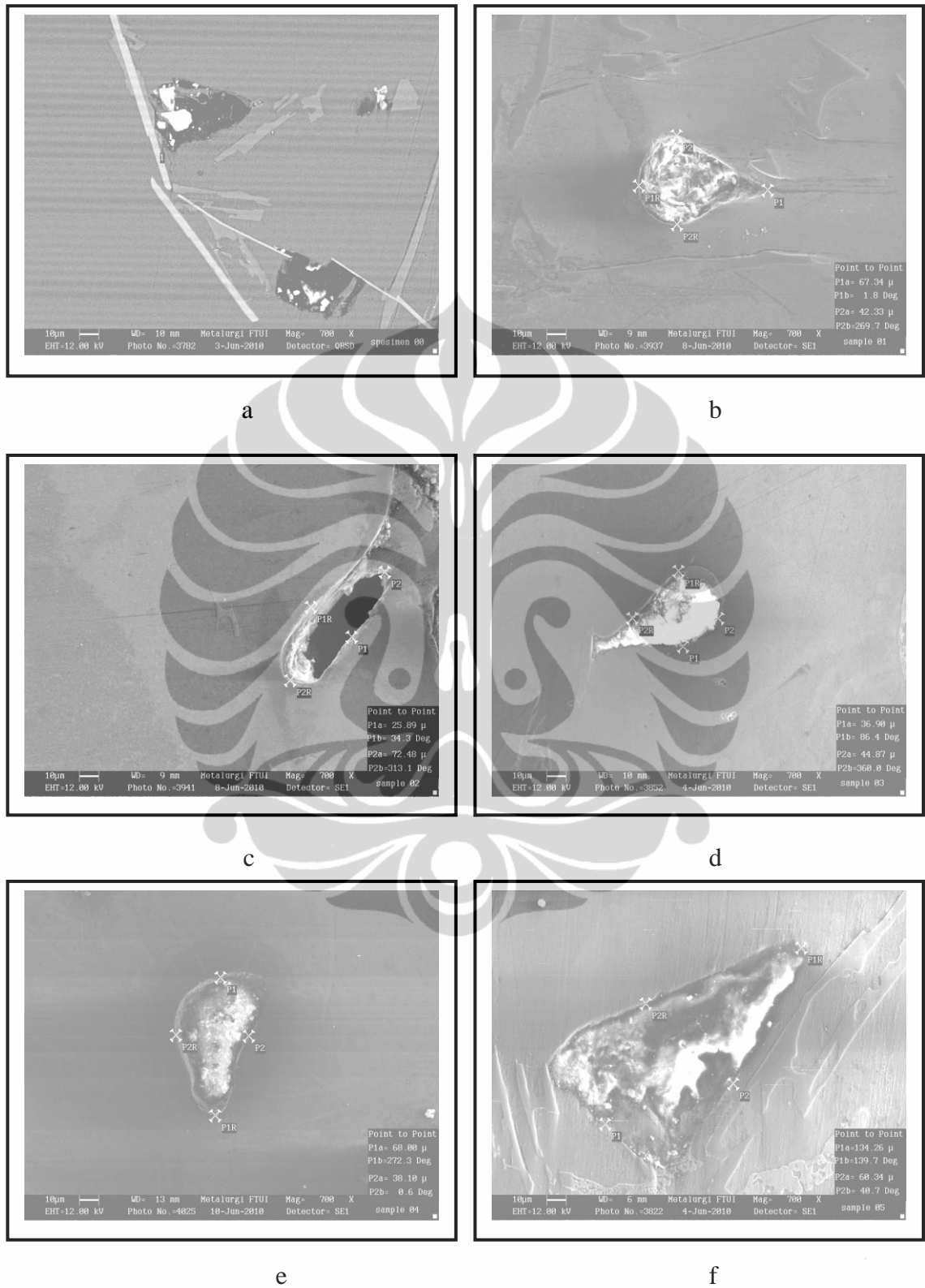
Lanjutan

Tebal mm	Cu 4.0% W di udara	Densitas teoritis 2.966					
		W _{awal}	W _{akhir}	Bucket + S	Bucket	Densitas	Porositas
5	29.1	228.59	207.42	21.17	3.88	2.464014	13.02458
	29.36	228.59	207.84	20.75	3.88	2.350681	17.02504
	29.09	228.59	207.92	20.67	3.88	2.365041	16.51816
Average	29.183333	228.59	207.7267	20.8633333	3.88	2.392077	15.56384
7.5	38.7	228.59	201.66	26.93	3.88	2.472843	12.7129
	38.94	228.59	201.29	27.3	3.88	2.509021	11.43591
	39.05	228.59	201.23	27.36	3.88	2.508028	11.47094
Average	38.896667	228.59	201.3933	27.1966667	3.88	2.496577	11.87516
10	49.47	228.59	194.51	34.08	3.88	2.567203	9.382178
	49.22	228.59	194.99	33.6	3.88	2.524103	10.90355
	49.2	228.59	194.88	33.71	3.88	2.54001	10.34203
Average	49.296667	228.59	194.7933	33.7966667	3.88	2.543688	10.21223
12.5	55.59	228.59	190.46	38.13	3.88	2.604967	8.049164
	55.91	228.59	190.72	37.87	3.88	2.550639	9.966866
	55.53	228.59	190.45	38.14	3.88	2.610719	7.846123
Average	55.676667	228.59	190.5433	38.0466667	3.88	2.588408	8.633657
15	67.62	228.59	182.99	45.6	3.88	2.610811	7.842894
	69.11	228.59	182.38	46.21	3.88	2.580657	8.907264
	69.24	228.59	182.54	46.05	3.88	2.557813	9.713622
Average	68.656667	228.59	182.6367	45.9533333	3.88	2.582696	8.835301
Replikasi							
5	29.1	228.59	207.87	20.72	3.88	2.373573	16.21699
	29.36	228.59	207.52	21.07	3.88	2.41249	14.84329
	29.09	228.59	207.68	20.91	3.88	2.412106	14.85683
Average	29.183333	228.59	207.69	20.9	3.88	2.399287	15.3093
7.5	38.7	228.59	202.02	26.57	3.88	2.417239	14.67564
	38.94	228.59	202.59	26	3.88	2.315101	18.28094
	39.05	228.59	168.66	27.36	3.88	2.508028	11.47094
Average	38.896667	228.59	191.09	26.6433333	3.88	2.41095	14.89762
10	49.47	228.59	194.72	33.87	3.88	2.539528	10.35906
	49.22	228.59	195.95	32.64	3.88	2.40567	15.08402
	49.2	228.59	195.85	32.74	3.88	2.418879	14.61775
Average	49.296667	228.59	195.5067	33.0833333	3.88	2.453384	13.39978
12.5	55.59	228.59	191.58	37.01	3.88	2.475067	12.63442
	55.91	228.59	192	36.59	3.88	2.409914	14.93421
	55.53	228.59	191.47	37.12	3.88	2.491252	12.06312
Average	55.676667	228.59	191.6833	36.9066667	3.88	2.458131	13.23223
15	67.62	228.59	185.07	43.52	3.88	2.416726	14.69374
	69.11	228.59	184.45	44.14	3.88	2.395494	15.44321
	69.24	228.59	184.59	44	3.88	2.377747	16.06963
Average	68.656667	228.59	184.7033	43.8866667	3.88	2.396393	15.41146

Lanjutan

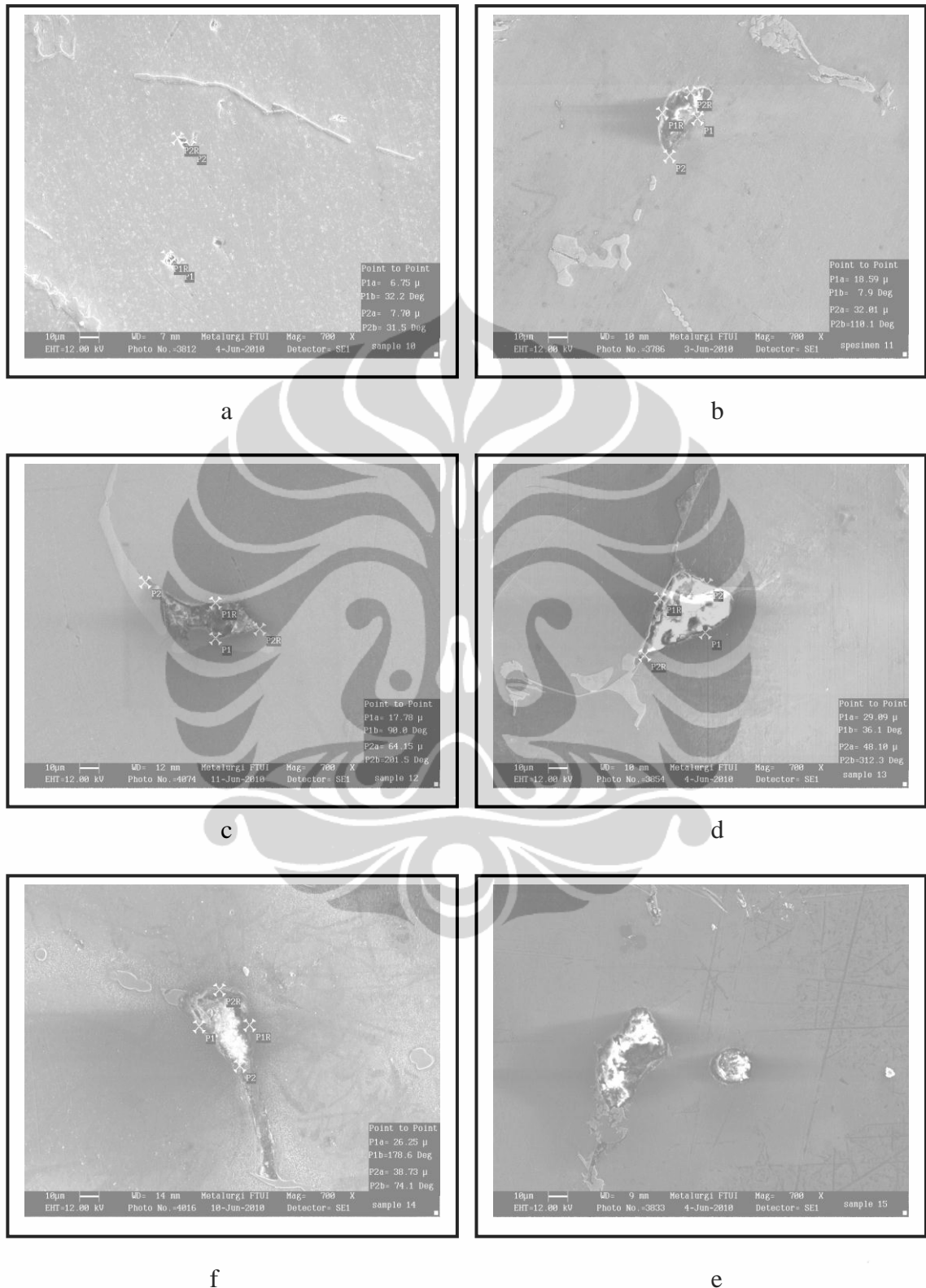
Tebal mm	Cu 4.5%		Densitas teoritis 3.061				
	W di udara	W _{awal}	W _{akhir}	Bucket + S	Bucket	Densitas	Porositas
5	28.87	228.59	207.65	20.94	3.88	2.444539	16.16809
	29.16	228.59	207.23	21.36	3.88	2.496575	14.38356
	29.52	228.59	207.2	21.39	3.88	2.457952	15.7081
Average	29.183333	228.59	207.36	21.23	3.88	2.466197	15.42534
7.5	38.81	228.59	201.14	27.45	3.88	2.546588	12.66845
	39.5	228.59	200.53	28.06	3.88	2.578329	11.57994
	38.84	228.59	201.5	27.09	3.88	2.484965	14.78173
Average	39.05	228.59	201.0567	27.5333333	3.88	2.536263	13.02252
10	49.22	228.59	194.67	33.92	3.88	2.566215	11.99538
	50.08	228.59	194.15	34.44	3.88	2.565574	12.01736
	48.65	228.59	195	33.59	3.88	2.568638	11.91228
Average	49.316667	228.59	194.6067	33.9833333	3.88	2.566794	11.97552
12.5	56.56	228.59	190.61	37.98	3.88	2.518255	13.6401
	57.81	228.59	188.37	40.22	3.88	2.692594	7.661375
	54.99	228.59	190.84	37.75	3.88	2.603693	10.71011
Average	56.453333	228.59	189.94	38.65	3.88	2.603536	10.71551
15	70.39	228.59	181.01	47.58	3.88	2.637317	9.557018
	69.22	228.59	181.11	47.48	3.88	2.701795	7.345834
	68.59	228.59	182.22	46.37	3.88	2.627969	9.877594
Average	69.4	228.59	181.4467	47.1433333	3.88	2.655274	8.941236
Replikasi							
5	28.87	228.59	208.05	20.54	3.88	2.364455	18.91443
	29.16	228.59	208.63	19.96	3.88	2.229358	23.5474
	29.52	228.59	207.53	21.06	3.88	2.39222	17.96226
Average	29.183333	228.59	208.07	20.52	3.88	2.326601	20.21258
7.5	38.81	228.59	202.28	26.31	3.88	2.369353	18.74647
	39.5	228.59	201.68	26.91	3.88	2.3983	17.75377
	38.84	228.59	202.46	26.13	3.88	2.341169	19.71298
Average	39.05	228.59	202.14	26.45	3.88	2.369539	18.74009
10	49.22	228.59	196.65	31.94	3.88	2.326087	20.23021
	50.08	228.59	195.01	33.58	3.88	2.457311	15.73007
	48.65	228.59	196.15	32.44	3.88	2.421603	16.95464
Average	49.316667	228.59	195.9367	32.6533333	3.88	2.400617	17.67433
12.5	56.56	228.59	191.15	37.44	3.88	2.45913	15.66768
	57.81	228.59	190.05	38.54	3.88	2.497192	14.36241
	54.99	228.59	191.74	36.85	3.88	2.497275	14.35956
Average	56.453333	228.59	190.98	37.61	3.88	2.484377	14.80188
15	70.39	228.59	181.86	46.73	3.88	2.555919	12.34847
	69.22	228.59	182.47	46.12	3.88	2.565604	12.01632
	68.59	228.59	184.53	44.06	3.88	2.414291	17.20539
Average	69.4	228.59	182.9533	45.6366667	3.88	2.510551	13.90428

Bentuk Porositas



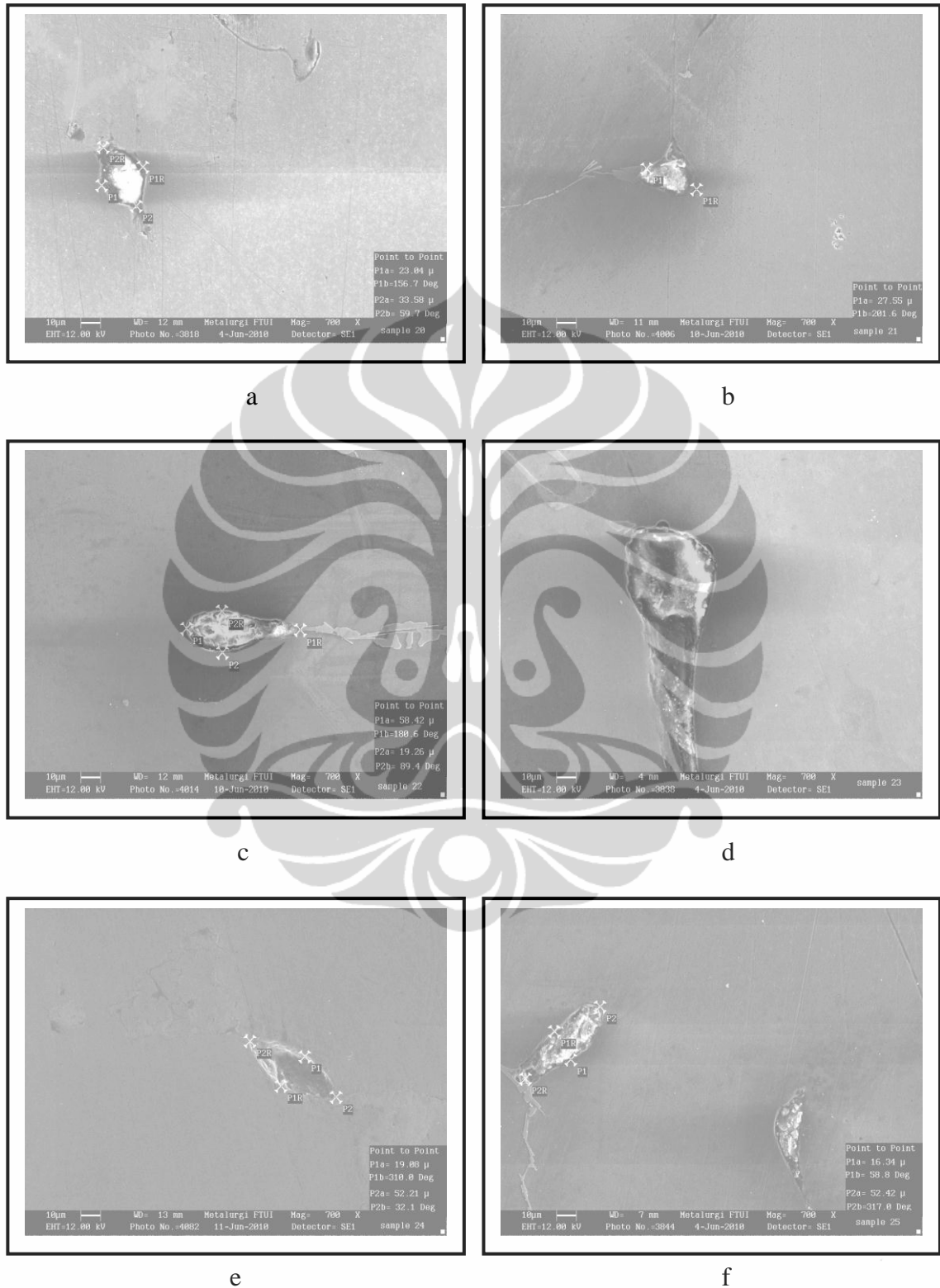
Gambar 5. Hasil pengamatan SEM hasil pengecoran vakum duralumin pada tekanan 76 cmHg, a). 0,0%Cu, b). 2,5%Cu, c). 3,0%Cu, d). 3,5%Cu, e). 4,0%Cu, f).4,5%Cu

Bentuk Porositas



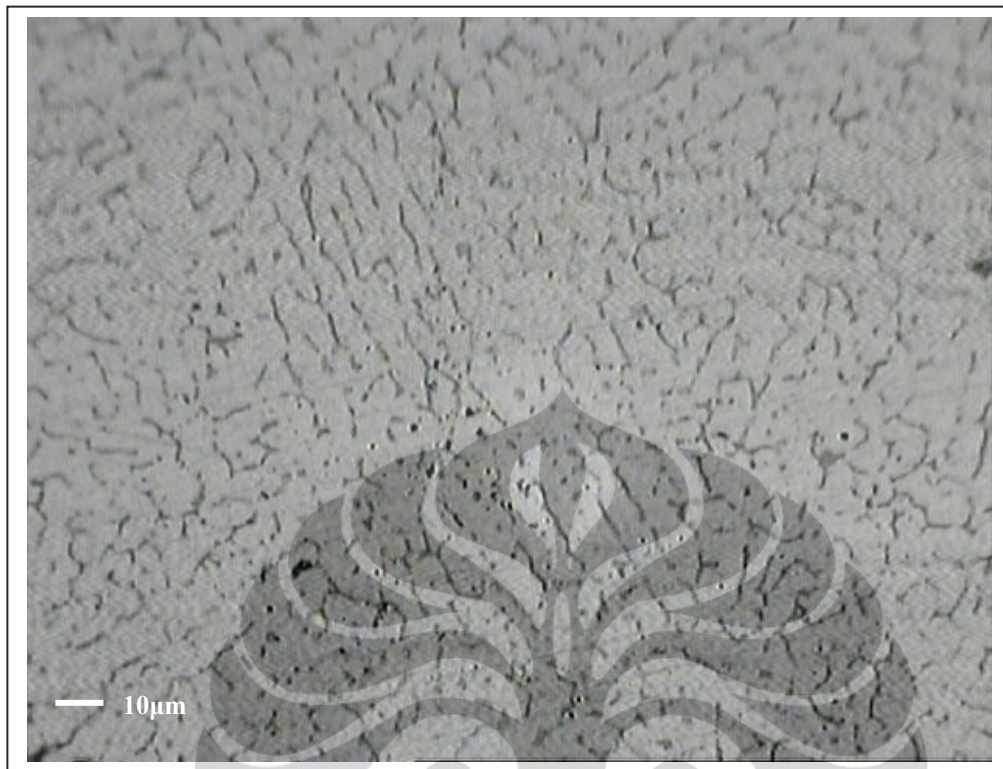
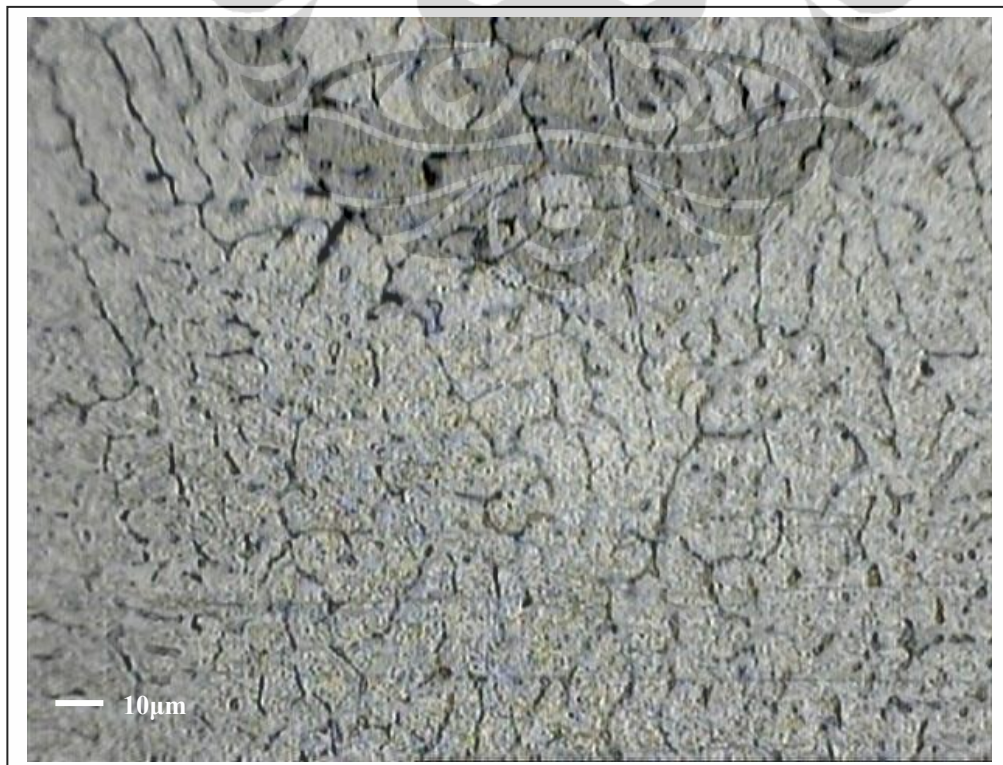
Gambar 6. Hasil pengamatan SEM hasil pengecoran vakum duralumin pada tekanan 40 cmHg, a). 0,0%Cu, b). 2,5%Cu, c). 3,0%Cu, d). 3,5%Cu, e). 4,0%Cu, f).4,5%Cu

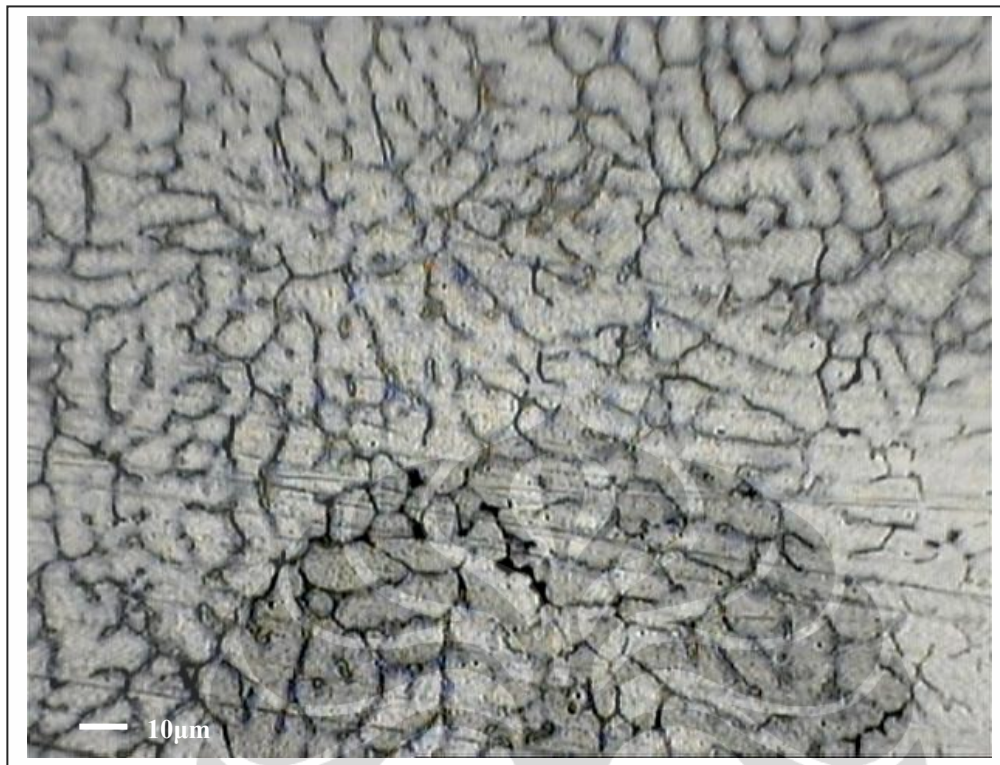
Bentuk Porositas



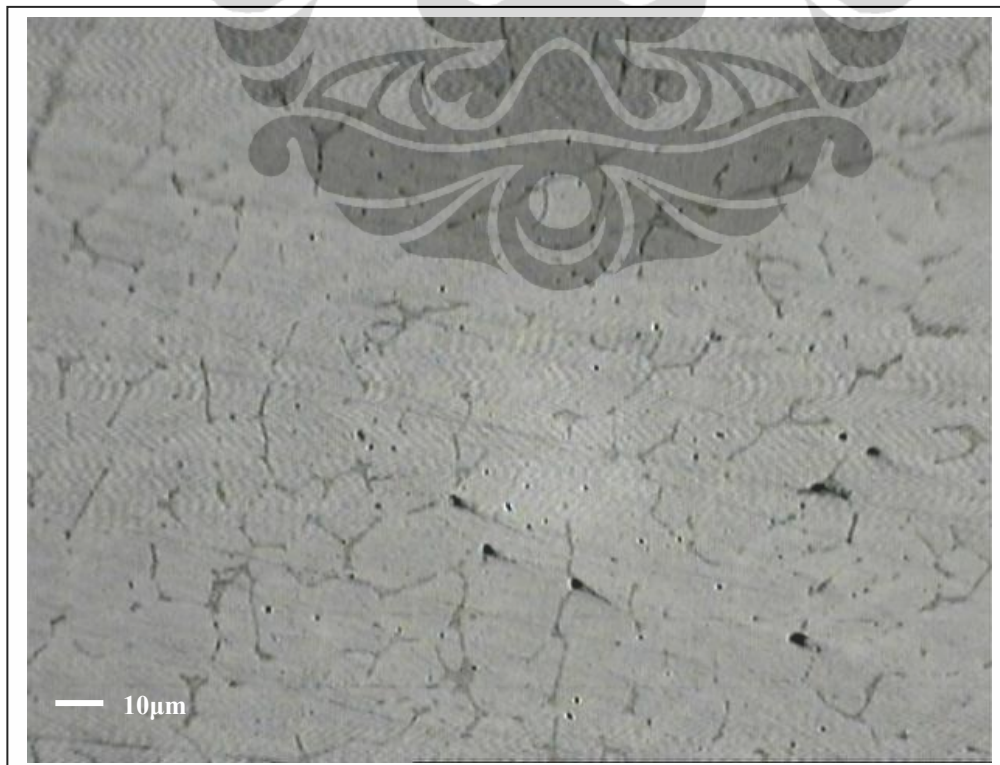
Gambar 7. Hasil pengamatan SEM hasil pengecoran vakum duralumin pada tekanan 30 cmHg, a). 0,0% Cu, b). 2,5% Cu, c). 3,0% Cu, d). 3,5% Cu, e). 4,0% Cu, f).4,5% Cu

Hasil photo mikroskop optic M 400x

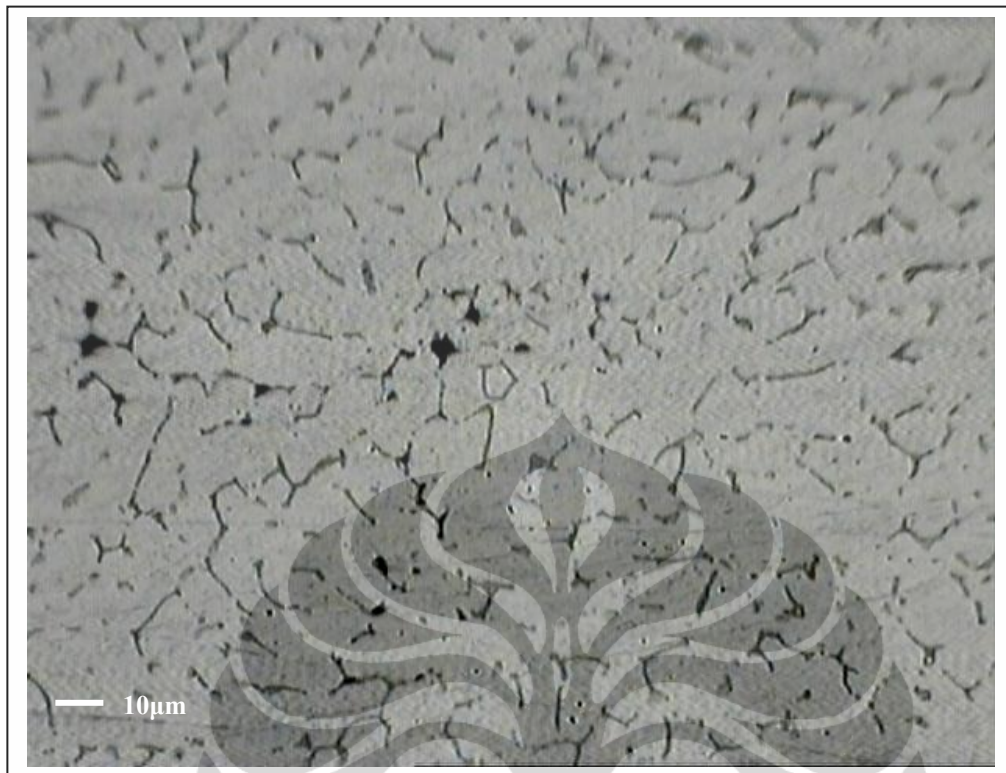
0,0% Cu, tebal 5,0mm, d_{butir} 23,2 μm0,0% Cu, tebal 10,0mm, d_{butir} 26,7 μm



0,0% Cu, tebal 7,5mm, d_{butir} 23,4 μm



2,5% Cu, tebal 10,0mm, d_{butir} 24,4 μm



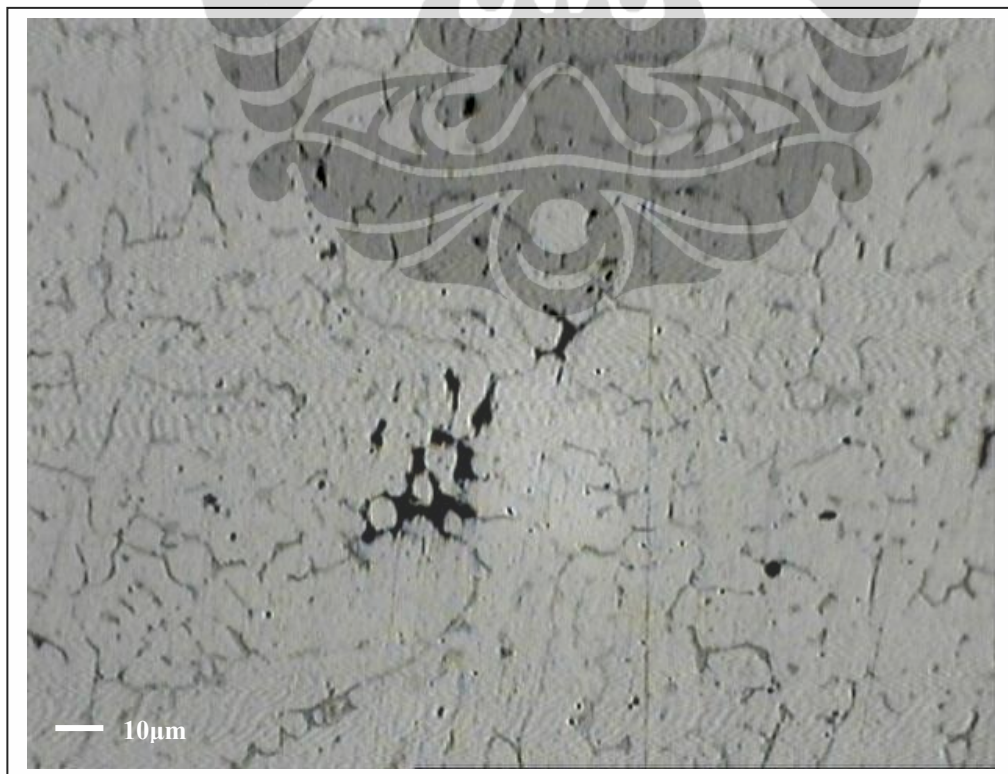
0,0%Cu, tebal 10,0mm, d_{butir} 24,7 μm



3,0%Cu, tebal 10,0mm, d_{butir} 23,5 μm



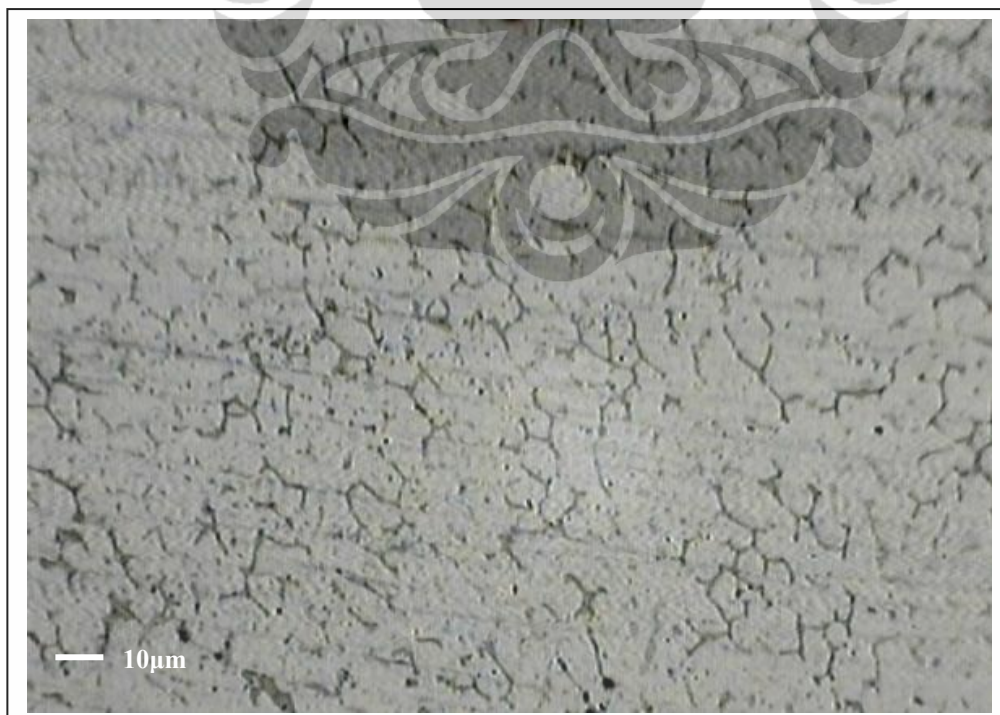
0,0%Cu, tebal 12,5mm, d_{butir} 26,1 μm



3,5%Cu, tebal 10,0mm, d_{butir} 22,5 μm

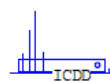


0,0%Cu, tebal 15,0mm, d_{butir} 26,9μm

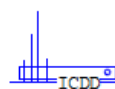


4,0%Cu, tebal 10,0mm, d_{butir} 27,1μm

04-0787		Wavelength= 1.78897			*
Al	2 θ	Int	h	k	l
Aluminum	44.988	100	1	1	1
	52.455	47	2	0	0
	77.376	22	2	2	0
Aluminum, syn [NR]	94.207	24	3	1	1
	99.844	7	2	2	2
Rad.: CuK α 1 λ : 1.54056 Filter: Ni Beta d-sp:	124.142	2	4	0	0
Cut off: Int.: Diffract. I/Icor.: 3.619	148.710	8	3	3	1
Ref: Swanson, Tatge, Natl. Bur. Stand. (U.S.), Circ. 539, I, 11 (1953)	162.108	8	4	2	0
		8	4	2	2
Sys.: Cubic S.G.: Fm3m (225)					
a: 4.0494 b: c: A: C:					
α : β : γ : Z: 4 mp:					
Ref: Ibid.					
Dx: 2.699 Dm: SS/FOM: F _g = 93(.0108 , 9)					
<p>Color: Light gray metallic Pattern taken at 25 C. CAS #: 7429-90-5. The material used for the NBS sample was a melting point standard sample of aluminum prepared at NBS, Gaithersburg, MD, USA. The chemical analysis (%): Si 0.011, Cu 0.006, Fe 0.007, Ti 0.0001, Zr 0.003, Ga 0.004, Mo 0.00002, S 0.0001, Al 99.9+ (by difference). Mineral species of doubtful validity, Am. Mineral., 65 205 (1980). Cu type. Gold group, gold subgroup. PSC: cF4. Mwt: 26.98. Volume[CD]: 66.40.</p>					

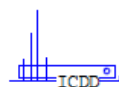
 . 1998 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved
 PCPDFWIN v. 2.01

25-0012		Wavelength= 1.78897					i				
CuAl2		2 θ	Int	h	k	l	2 θ	Int	h	k	l
Aluminum Copper		23.990	100	1	1	0	113.597	5	5	1	2
		34.259	35	2	0	0	115.099	3	2	2	4
		44.269	70	2	1	1	118.652	2	5	3	0
Khatyrkite, syn		49.267	35	2	2	0	120.946	17	3	1	4
Rad.: CuK α	λ : 1.5405	49.887	90	1	1	2	124.442	5	6	0	0
Filter:		55.566	70	3	1	0	150.484	3	5	2	3
Cut off:	Int.: Diffract.	56.138	60	2	0	2	154.555	2	2	1	5
	I/ICor.:	67.454	13	2	2	2	161.711	6	4	2	4
Ref: Havinga, Philips Research Lab, Eindhoven, The Netherlands, Private Communication, (1973)		72.263	2	4	0	0		6	6	2	2
		72.763	6	3	1	2					
		78.883	6	4	1	1					
Sys.: Tetragonal	S.G.: I4/mcm (140)	79.764	9	2	1	3					
a: 6.0654(9)	b:	82.472	11	4	2	0					
	c: 4.8732(10)	87.971	21	4	0	2					
α :	β :	92.915	20	3	3	2					
	γ :	94.409	8	0	0	4					
Ref: Havinga et al., J. Less-Common Met., 27, 169 (1972)	Z: 4	97.470	11u	5	1	0					
	mp:	97.912	u	4	2	2					
		99.037	9u	4	3	1					
Dx: 4.354	Dm:	99.496	u	1	1	4					
	SS/FOM: F ₃₀ = 15(0.048, 43)	104.667	1	2	0	4					
Cell parameters generated by least squares refinement. Reference		109.105	5	5	2	1					
reports: a=6.063, c=4.872. Al2 Cu type. PSC: t112. To replace		110.145	3	4	1	3					
2-1309. Mwt: 117.51. Volume[CD]: 179.28.		113.108	3	4	4	0					



© 1998 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved
PCPDFWIN v. 2.01

83-2081		Wavelength= 1.78897				C
Al2O3		2θ	Int	h	k	l
Aluminum Oxide		30.096	753	0	1	2
		41.555	999*	1	0	4
		44.566	503	1	1	0
Corundum - synthetic		49.505	2	0	0	6
Rad.: CuK α 1 λ : 1.54060 Filter:		51.333	936	1	1	3
d-sp: Calculated		54.715	17	2	0	2
Cut off: 17.7 Int.: Calculated I/Icor.: 1.01		62.564	473	0	2	4
Ref: Calculated from ICSD using POWD-12++, (1997)		68.788	935	1	1	6
Ref: Finger, L.W., Hazen, R.M., Year Book Carnegie Inst. Washington, 76, 525 (1977)		71.379	23	2	1	1
		73.137	35	1	2	2
		73.691	60	0	1	8
Sys.: Rhombohedral S.G.: R $\bar{3}c$ (167)		80.026	351	2	1	4
a: 4.718(4)	b:	82.106	514	3	0	0
	c: 12.818(1)	85.093	10	1	2	5
α :	β :	90.385	11	2	0	8
	γ :	94.002	151	1	0	10
Ref: Ibid.		94.385	110	1	1	9
		98.640	63	2	2	0
Dx: 4.111 Dm: ICSD #: 200141		102.314	13	0	3	6
		103.761	38	2	2	3
		104.822	2	1	3	1
Peak height intensity. R-factor: 0.055. PSC: hR10. Mwt: 101.96. Volume[CD]: 247.10.		106.560	34	3	1	2
		107.115	22	1	2	8



. 1998 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved
PCPDFWIN v. 2.01

79-1736		Wavelength= 1.78897					C				
Al4C3		2 θ	Int	h	k	l	2 θ	Int	h	k	l
Aluminum Carbide		12.340	8	0	0	3	81.316	2	1	0	16
		24.826	80	0	0	6	83.864	84	0	2	7
		36.332	459	1	0	1	86.200	7	0	1	17
		37.070	999*	0	1	2	86.857	83	1	1	12
		37.621	55	0	0	9	91.378	28	0	2	10
Rad.: CuK α 1 λ : 1.54060 Filter: d-sp: Calculated		39.906	1	1	0	4	94.470	5	2	0	11
Cut off: 17.7 Int.: Calculated I/Icor.: 1.07		41.928	421	0	1	5	96.808	1	1	0	19
Ref: Calculated from ICSD using POWD-12++, (1997)		46.970	514	1	0	7	97.591	1	0	0	21
Ref: Gesing, T.M., Jeitschko, W., Z. Naturforsch., B: Chem. Sci., 50, 196 (1995)		49.919	19	0	1	8	98.806	1	1	1	15
		50.925	82	0	0	12	101.606	5	0	2	13
Sys.: Rhombohedral S.G.: R $\bar{3}m$ (166)		56.533	153	1	0	10	102.632	1	0	1	20
a: 3.335(1) b: c: 24.967(3) A: C: 7.4864		60.162	21	0	1	11	105.693	19	2	0	14
α : β : γ : Z: 3 mp:		64.881	940	1	1	0	110.207	22	2	1	1
Ref: Ibid.		65.014	509	0	0	15					
		66.335	2	1	1	3					
		68.017	21	1	0	13					
		70.604	16	1	1	6					
		72.241	67	0	1	14					
Dx: 2.982 Dm: ICSD #: 066751		76.697	34	0	2	1					
		77.150	91	2	0	2					
		78.954	1	0	2	4					
Peak height intensity. R-factor: 0.033. PSC: hR7. Mwt: 143.96. Volume[CD]: 240.49.		80.300	73	2	0	5					
		80.300	73	0	0	18					



© 1998 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved
PCPDFWIN v. 2.01

Sudut 2θ [deg]	Data Uji XRD Material Duralumin									
	Tembaga [%]					Tembaga [%]				
	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
19.99	649.67	782.45	852.23	846.27	363.27	681.16	568.87	582.76	597.47	276.84
20.01	649.67	701.5	825.39	846.27	351.64	677.1	553.93	582.76	561.19	276.4
20.03	649.67	659.21	806.17	846.27	361.9	673.03	567.02	582.76	585.21	275.96
20.05	711.3	708.25	881.42	920.92	370.87	728.78	608.85	634.54	618.25	297.77
20.07	738.27	756.97	917.55	955.95	387.38	767.47	648.47	655.29	659.65	307.42
20.09	745.04	799.27	941.76	972.35	401.41	791.9	674.08	661.42	687.15	310.36
20.11	718.79	812.52	947.61	960.39	413.56	782.94	678.43	644.41	697.73	303.42
20.13	690.71	815.48	957.94	961.31	421.1	766.63	678.59	630.32	695.46	300.57
20.15	669.15	810.48	970.62	972.95	422.15	749.25	680.52	620.14	684.15	301.82
20.17	660.1	803.88	984.78	990.94	415.6	739.66	690.55	618.68	668.75	306.17
20.19	662.59	793.85	991.37	1000	404.05	739.17	704.17	624.19	654.79	309.92
20.21	671.37	780.41	990.85	990.92	393.43	744.33	707.62	634.55	649.84	308.98
20.23	681.74	768.63	986.7	969.18	389.86	747.36	696.72	644.73	656.41	303.81
20.25	696.09	762.71	983.25	952.16	393.81	746.95	677.49	649.32	671.96	300.08
20.27	711.1	765.18	981.22	950.63	400.7	745.88	658.45	643.74	687.06	299.49
20.29	720.38	777.07	983.89	963.95	405.61	745.23	651.08	631.01	689.61	301.75
20.31	721.07	791.01	988.44	978.3	404.94	744.36	660.53	618.71	678.11	305.46
20.33	710.16	800.22	987.7	975.71	399.69	742.3	678.13	614.77	661.87	306.81
20.35	693.17	805.28	980.94	950.44	394.91	735.76	696.34	621.85	650.3	305.62
20.37	680.63	805.69	970.93	913.55	392.31	728.61	707.57	635.41	648.15	305.04
20.39	677.07	804.32	961.74	885.63	390.88	728.75	707.66	646.28	650.95	305.96
20.41	679.61	805.63	962.36	883.48	388.43	736.64	700.4	647.77	650.09	308.34
20.43	684.04	805.49	972.09	907.38	382.42	745.17	694.49	640.22	642.17	311.59
20.45	685.14	800.33	982.61	941.48	374.33	747.29	696.74	628.92	632.34	313.85
20.47	685.51	794.11	988.02	968.35	368.33	735.28	711.45	619.69	628.15	312.94
20.49	689.84	786.12	984.48	978.43	367.66	714.61	732.85	617.31	633.05	308.8
20.51	695.04	777.44	972.91	974.54	372.38	698.94	750.59	620.85	642.66	303.33
20.53	695.57	774.51	958.15	964.04	379.35	696.83	754.48	625.3	651.27	299.35
20.55	690.53	774.18	945.14	951.2	384.59	709.56	742.16	628.88	652.93	299.68
20.57	680.8	773.72	939.99	934.86	386.41	732.07	723.01	630.48	644.63	306.15
20.59	675.33	778.66	944.64	918.04	385.73	749.88	708.96	628.89	631.44	315.88
20.61	680.39	785.51	955	907.94	385.53	755.27	704.88	626.8	618.56	326.36
20.63	686.48	790.11	965.21	912.19	386.35	746.38	711.28	625.85	608.89	337.52
20.65	685.06	796.24	964.21	930.93	387.49	725.8	720.34	625.7	608.45	348.63
20.67	674.33	799.54	950.33	955.12	386.52	701.08	724.44	627.68	615.94	357.43
20.69	656.93	798.48	933.32	968.14	382.11	681.18	725.42	631.54	623.66	361.49
20.71	645.35	799.59	923.08	965.54	375.58	670.91	725.95	634.27	630.53	357.65
20.73	648.53	798.82	927.18	953.47	369.13	675.36	727.36	636.29	633.65	347.97
20.75	658.47	791.08	948.74	943.8	365.04	693.84	731.5	638.64	633.65	338.28
20.77	666.83	779.45	975.81	945.32	366.21	721.02	734.92	641.03	638.07	332.34
20.79	667.05	765.85	996.61	954.53	372.03	746.69	735.12	644.12	646.19	329.15
20.81	656.55	755.72	1000	956	381.53	762.4	734.66	648.94	651.78	323.97
20.83	642.23	756.99	979.79	942.98	392.24	763.37	736.69	652.23	653.3	312.55
20.85	632.43	766.04	942.31	917.27	398.39	753.49	743.5	655.29	646.26	297.66
20.87	629.57	773.81	903.85	890.48	396.86	741.16	753.64	657.97	634.4	285.3
20.89	635.92	772.98	878.34	876.82	387.76	734.81	762.95	656.45	626.28	280
20.91	648.25	762.26	874.63	879.15	373.58	735.22	768.47	650.65	623.73	282.34
20.93	659.5	747.54	885.69	888.64	362.26	740.47	769.99	642.53	626.12	287.94
20.95	664.57	738.85	900.86	896.35	359.09	744.46	770.68	632	631.56	292.3
20.97	660.68	742.32	910.19	898.87	362.97	744.73	772.39	627.75	633.08	295.49
20.99	650.43	757.58	908.8	900.91	370.67	743.2	772.31	632.65	629.93	298.19

Sudut 2θ [deg]	Data Uji XRD Material Duralumin									
	Tembaga [%]					Tembaga [%]				
	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
21.01	641.86	775.07	897.85	910.23	375.41	743.68	769.74	642.6	623.92	301.2
21.03	639.17	785.93	883.22	928.21	372.67	746.04	766.51	655.51	617.05	304.32
21.05	642.23	785.84	869.82	947.27	366.48	749.73	766.62	664.93	614.08	304.7
21.07	649.07	775.07	869.88	955.64	361.14	751.48	772.93	665.51	616.06	300.82
21.09	655.77	761.32	888.97	947.2	359.7	750.81	784.05	663.25	618.99	293.53
21.11	660.57	755.14	923.16	924.22	364.46	750.43	793.24	661.66	618.84	284.92
21.13	662.39	758.97	959.97	896.27	370.96	753.71	796.45	663.23	612.35	278.7
21.15	656.19	769.92	983.94	876.97	373.45	759.86	793.58	671.68	601.56	277.48
21.17	641.03	779.82	984.48	874.6	371.16	766.27	787.51	681.81	592.95	280.58
21.19	621.95	777.9	968.45	889.74	363.9	767.08	779.53	688.86	590.05	285.98
21.21	607.44	763.03	945.93	914.34	354.52	757.06	772.49	690.9	594.15	289.54
21.23	607.54	743.98	928.03	937.17	349.37	736.72	768.42	685.09	602.13	290.25
21.25	622.9	732.98	920.94	949.13	350.58	711.55	770.54	673.66	608.88	288.93
21.27	642.77	737.78	921.24	946.63	356.48	688.88	779.53	662.16	613.01	287.27
21.29	658.85	754.09	921.35	929.16	364.61	676.78	792.7	653.95	614.18	286.85
21.31	663.69	767.56	920.46	899.44	371.19	677.85	803.09	655.16	611.12	288.54
21.33	657.16	764.65	915.94	859.42	373.81	688.11	807.22	664.64	605.89	290.08
21.35	648.56	741.06	911.18	818.23	374.69	703.66	806.99	676.44	601.37	291.39
21.37	643.52	708.45	910.58	788.82	375.89	719.98	807.32	686.31	600.61	291.32
21.39	644.57	683.75	909.7	780.7	377.46	732.18	809.71	689.03	607	290.11
21.41	655.55	679.84	901.18	793.49	378.81	736.62	812.51	683.04	618.43	289.41
21.43	668.42	698.4	884.52	815.26	378.87	730.66	810.21	674.92	626.79	291.52
21.45	675.04	726.67	861.07	831.94	376.19	712.64	800.22	667.29	625.6	295.43
21.47	671.23	748.05	839.93	837.77	371.67	688.28	787.65	662.09	613.77	299.42
21.49	655.44	754.48	831.55	836.51	367.01	667.58	778.38	660.96	594.98	299.69
21.51	632.91	745.59	836.96	837.97	363.29	659.67	776.38	659.63	578.04	294.68
21.53	616.61	731.96	850.42	845.99	360.97	667.23	781.03	651.92	569.51	286.16
21.55	611.79	725.21	867.22	855.54	359.68	687.91	787.2	637.48	569.15	278.66
21.57	619.3	727.25	881.62	862.53	358.33	713.1	792.51	620.57	575.55	275.01
21.59	631.68	733.75	889.8	862.39	355.52	733.11	800.84	608.84	586.2	276.13
21.61	639.35	735.92	890.33	856.56	351	743.2	813.01	609.76	595.6	278.87
21.63	634.33	724.27	882.7	852.54	345.46	743.09	828.12	622.99	601.19	279.2
21.65	622.56	701.59	868.91	852.63	339.56	732.1	840.42	636.11	600.71	275.3
21.67	614.7	677.28	854.94	855.08	334.19	715.76	842.98	637.59	591.77	268.93
21.69	620.11	661.54	845.18	858.48	331.09	702.34	835.44	627.97	579.61	264.53
21.71	637.89	662.19	840.92	857.53	331.58	695.02	826.04	615.06	571.78	266.3
21.73	657.69	677.87	840.93	850.95	336.4	696.58	820.35	612.58	572.87	274.26
21.75	664.34	699.89	843.9	841.41	344.79	705.79	821.4	628	585.74	284.33
21.77	655.85	722.97	850.95	830.32	354.25	713.17	828.12	652.09	606.62	290.94
21.79	636.69	741.94	864.22	820.49	360.89	714.54	836	668.7	624.64	291.29
21.81	615.21	754.07	882.52	814.61	362.06	713.61	842.02	667.18	632.02	287.52
21.83	599.42	756.61	902.7	810.52	357.95	710.87	845.63	644.7	625.92	283.35
21.85	590.35	746.55	920.11	806.92	350.75	710.17	843.09	611.53	609.42	282.16
21.87	586.74	727.17	931.08	803.57	343.44	711.81	832.65	581.96	591.26	283.95
21.89	591.5	709.67	934.9	801.14	338.71	709.13	816.29	567.73	579.95	285.46
21.91	601.97	701.61	934.32	805.72	336.5	698.74	798.31	572.05	576.17	283.68
21.93	615.26	707.7	930.25	818.71	334.45	683.64	786.01	590.84	576.98	279.25
21.95	629.34	722.16	922.65	832.66	331.34	667.13	784.56	616.47	579.24	274.94
21.97	639.61	732.58	910.72	839.76	327.46	659.94	793.62	639.49	581.36	274.38
21.99	643.51	735.69	893.76	835.27	324.96	666.95	811.31	652.66	583.5	278.89
22.01	641.49	735.1	870.92	823.58	327.12	685.35	832.27	656.72	587.45	285.5

Sudut 2θ [deg]	Data Uji XRD Material Duralumin									
	Tembaga [%]					Tembaga [%]				
	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
22.03	632.05	731.81	848.06	820.24	333.91	705.63	848.54	652.99	589.72	287.96
22.05	617.4	731.07	832.29	831.53	341.23	715.84	855.09	643.01	586.77	283.71
22.07	601.86	732.22	829.32	850.46	345.31	711.27	850.09	629.82	578.21	274.24
22.09	590.15	731.04	842.4	861.52	343.79	702.14	837.04	611.25	566.52	263.72
22.11	584.38	730.23	868.91	850.69	338.92	696.5	825.43	586.35	556.08	257.9
22.13	586.6	731.32	896.9	819.45	336.3	700.34	820.39	560.94	554.51	259.53
22.15	593.69	731.22	918.13	784.79	337.97	709.28	818.68	542.86	562.27	265.89
22.17	602.48	730.77	929.18	762.32	342.5	713.93	814.49	539.18	574.65	274.33
22.19	610.13	728.65	928.75	761.5	346.71	712.67	803.58	553.82	583.65	281.55
22.21	615.29	724.95	919.73	777	347.18	713.56	788.41	578.28	581.8	284.48
22.23	618.96	724.18	906.35	796.63	344.62	719.18	779.84	598.72	566.59	283
22.25	626.57	727.74	888.1	810.57	342	729.44	784.47	603.39	548.82	278.27
22.27	636.09	732.67	868.14	815.22	341.25	734.46	798.49	588.41	539.96	271.61
22.29	643.58	737.09	852.09	811.06	343.62	726.29	812.93	560.85	545.63	266.25
22.31	643.17	735.68	838.42	804.56	347.26	706	818.6	534.94	562.49	264.1
22.33	631.44	724.56	823.75	800.21	349.19	683.08	811.86	520.27	580.73	264.91
22.35	613.28	707.57	811.59	799.77	347.16	666.35	800.45	520.59	588.57	267.75
22.37	599.56	689.34	806.35	800.92	339.41	663.4	793.09	530.32	587.01	270.69
22.39	594.32	674.81	815.3	803.53	329.27	670.99	794.41	538.34	581.54	272.06
22.41	596.62	674.52	843.09	807.57	322.09	683.92	803.79	535.96	577.2	272.6
22.43	600.08	689.41	876.76	813.93	320.32	696.41	817.27	521.78	575.78	273.04
22.45	600.98	711.74	896.09	824.06	323.31	703.91	829.22	499.35	575.54	273.76
22.47	601.47	734.31	893.9	834.53	327.25	704.12	837.91	478.16	571.33	275.09
22.49	608.54	744.95	871.86	837.34	327.85	700.13	842.24	466.49	564.78	276.3
22.51	623.85	737.37	843.33	831.77	327.19	693.5	843.35	465.02	558.66	276.67
22.53	642.46	721.95	824.57	820.95	329.15	688.18	840.28	468.43	556.44	276.63
22.55	653.42	707.05	819.27	807.19	334.67	689.18	834.46	472.44	559.43	275.22
22.57	648.2	695.78	823.13	795.78	340.01	697.76	828.16	472.94	565.96	271.87
22.59	624.97	688.52	831.25	787.18	340.03	709.54	821.98	470.48	571.01	266.79
22.61	591.4	678.76	837.31	775.54	332.09	718.49	814.85	470.26	570.74	260.85
22.63	557.23	664.83	840.23	761.22	320.89	717.35	807.51	474.33	562.48	256.22
22.65	533.66	655.57	839.01	748.59	314.34	704.89	798.1	480.88	548.15	255.07
22.67	525.26	656.2	835.77	740.15	317.24	688.82	789.87	487.91	533	256.91
22.69	531.06	665.72	834.97	743.67	327.18	680.21	788.97	491.01	523.41	260.15
22.71	545.13	677.68	837.87	762.4	337.33	684.51	794.73	487.39	524.39	262.7
22.73	560.43	682.39	845.39	786.68	340.54	700.11	801.57	480.27	536.06	263.51
22.75	570.61	676.91	855.66	806.87	336.02	720.37	804.06	475.81	552.7	262.62
22.77	575.29	668.35	859.68	814.56	328.12	739.65	796.86	479.49	566.15	260.55
22.79	575.99	665.04	855.35	803.76	322.54	753.85	783.59	491.71	570.86	258.04
22.81	578.41	673.81	842.02	784.84	322.38	763.13	774.39	506.18	567.89	255.35
22.83	584.34	692.95	820.81	772.41	326.54	765.08	772.18	514.02	564.44	253.1
22.85	595.34	712.09	800.01	771.38	331.11	754.88	772.1	510.05	566.22	252.5
22.87	610.29	720.77	787.14	782.15	334.11	732.94	765.65	498.14	572.01	253.16
22.89	624.11	714.37	785.26	796.07	334	706.64	745.96	486.91	573.81	254.76
22.91	631.4	697.77	799	799.81	330.26	681.15	718.22	481.37	563.63	257.42
22.93	631.58	684.79	823.01	792.19	323.55	665.09	696.29	482.52	542.94	260.76
22.95	621.99	682.68	848.31	778.16	316.18	662.22	691.27	487.49	521.92	265.12
22.97	607.76	688.57	866.69	764.06	311.13	667.86	704.7	491.61	509.67	269.65
22.99	594.77	693.16	870.58	755.52	311.33	677.92	724.57	494.34	509.5	271.8
23.01	585.95	684.94	857.79	750.22	316.24	689.89	735.8	495.9	517.72	270.47
23.03	582.12	664.92	836.79	741.65	322.54	695.38	731.71	493.71	526.96	265.62

Sudut 2θ [deg]	Data Uji XRD Material Duralumin									
	Tembaga [%]					Tembaga [%]				
	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
23.05	583.05	647.36	817.49	729.22	325.86	694.36	710.68	487.11	535.02	259.84
23.07	583.07	642.54	810.1	714.84	325.21	690.48	679.43	475.93	543.09	256.96
23.09	580.05	652.03	816.99	706.17	322.67	684.7	648.3	461.92	547.41	258.04
23.11	572.61	669.21	831.07	709.12	320.18	678.68	620.31	450.01	544.45	262.15
23.13	562.39	679.93	839.31	721.07	318.27	675.5	600.48	443.68	534.04	267.17
23.15	550.78	678.65	836.16	736.34	316.87	672.84	594.36	444.24	519.7	269.49
23.17	541.66	671.18	825.89	750.68	314.62	672.94	596.58	451.64	510.62	268.03
23.19	537.3	662.66	819.71	758.82	312.98	677.65	600.98	460.68	514.85	263.03
23.21	539.78	655.05	824.92	762.75	314.74	683.19	601.15	466.82	527	255.27
23.23	549.05	649.09	840.54	767.24	318.87	682.75	588.56	467.59	537.11	248.08
23.25	562.42	642.57	853.46	773.83	322.65	675.85	565.09	462.15	537.68	244.16
23.27	571.75	638.28	854.74	781.65	324.05	665.98	538.54	455.41	528.28	244.8
23.29	572.48	642.66	843.12	787.43	321.6	659.84	514.11	452.75	517.4	249.94
23.31	564.61	657.43	825.94	785.1	317.89	661.92	497.91	454.1	516.83	256.57
23.33	554.35	676.87	814.75	772.12	316.55	670.95	491.72	458.69	527.33	261.52
23.35	549.05	693.08	815.07	753.97	318.2	678.45	493.54	465.62	542.12	263.81
23.37	550.39	699.65	820.07	740.24	321.78	679.03	501.25	471.88	551.9	262.29
23.39	553	695.79	823.1	734.79	324.84	673.3	510.25	477.41	550.33	258.37
23.41	550.47	685.84	816.44	736.31	325.09	662.4	514.94	481.51	539.15	253.85
23.43	540.44	676.21	800.5	738.98	322.45	649.15	512.69	479.98	528.09	249.95
23.45	529.66	667.77	787.53	734.18	317.86	639.36	503.06	471.03	523.92	248.47
23.47	526.9	659.91	785.33	722.8	314.31	635.14	490.73	458.64	528.02	250.03
23.49	534.31	653.82	792.93	713.99	314.98	635.95	482.89	446.31	536.89	252.49
23.51	547.45	648.71	805.56	713.5	319.09	642.53	484.38	437.32	543.02	254.46
23.53	556.51	644.09	813.31	722.99	323.38	650.02	494.86	433.49	542.36	254.61
23.55	553.82	641.27	810.36	737.37	323.6	652.14	508.54	431.97	537.55	253.13
23.57	541.87	639.54	803.53	745.8	317.34	648.72	516.75	431.83	533.37	251.61
23.59	530.39	641.65	798.61	742.7	308.31	640.79	512.52	436.64	533.26	250.63
23.61	527.83	652.61	796.74	733.5	303.26	628.81	495.53	447.05	536.03	249.35
23.63	537.08	672.18	797.92	727.67	304.53	618.54	473.11	459.75	535.48	247.6
23.65	552.37	695.02	799.3	731.95	310.34	611.56	455.06	469.24	528.75	246.51
23.67	563.12	710.64	796.17	746.05	316.02	605.83	448.19	468.87	517.94	247.26
23.69	560.77	710.73	790.42	761.22	316.94	603.46	453.84	460.24	508.8	250.68
23.71	546.14	694.53	781.13	766.38	313.17	605.32	465.29	450.65	506.65	254.97
23.73	526.41	668.85	765.32	759.16	308.89	610.67	473.97	445.66	509.59	256.63
23.75	509.94	645.52	747.57	741.78	306.27	622.58	475.35	446.55	510.9	254.69
23.77	502.6	636.78	732.98	718.94	307.26	637.18	469.95	448.92	508.98	251.25
23.79	506.17	643.5	728.06	696.31	311.85	645.66	463.65	446.85	506.97	248.04
23.81	516.36	659.65	739.39	678.53	317.16	643.51	463.39	442.48	510.11	247.92
23.83	528.79	674.01	760.68	671.36	320.22	628.23	472.01	441	521.27	249.99
23.85	539.1	677.25	781.53	678.65	319.34	603.92	486.55	446.61	535.16	251.38
23.87	542.61	669.03	796.81	696.2	312.7	582.88	499.25	459.37	542.75	251.48
23.89	538.38	662.9	799.4	715.21	304.13	574.04	503.66	472.55	542.11	249.84
23.91	533.79	666.62	791.16	721.5	298.44	580.02	499.41	477.93	539.39	245.71
23.93	537.05	680.59	778.02	709.28	297.99	596.93	489.04	473.68	541.88	241.68
23.95	552.69	696.93	761.69	686.43	301.92	613.23	479.82	464.88	554.41	238.51
23.97	576.97	703.58	749.02	663.62	306.48	618.27	476.9	459.83	574.86	236.75
23.99	597.41	693.23	750.99	652.03	306.72	609.43	479.41	463.91	594.67	237.49
24.01	601.31	675.36	766.75	657.78	303.92	593.76	486.52	475.9	607.23	238.75
24.03	589.6	657.54	787.93	672.42	301.88	582.85	495.96	488.91	612.7	238.11
24.05	572.84	648.08	800.39	689.63	304.44	586.1	501.12	496.68	613.98	236.58

Sudut 2θ [deg]	Data Uji XRD Material Duralumin									
	Tembaga [%]					Tembaga [%]				
	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
24.07	563.08	650.06	792.21	703.8	312.4	602.69	499.29	502.7	618.15	236.33
24.09	565.79	658.33	765.16	709.93	322.6	621.9	488.16	517.14	629.98	239.77
24.11	575.06	665.28	739.66	709.52	329.29	633.35	467.75	551.51	648.29	247.53
24.13	578.15	668.6	735.28	707.47	329.37	632.82	446.62	612.58	668.62	256.21
24.15	570.75	664.79	760.2	705.74	322.97	620.28	433.85	698.45	688.01	261.04
24.17	559.7	659.1	805.86	708.17	313.54	602.36	434.11	796.58	708.48	259.23
24.19	557.78	656.44	853.01	711.69	305.19	583.79	448.18	890.95	739.88	252.65
24.21	576.69	661.4	877.13	712	301.1	566.12	468.23	963.64	788.27	245.68
24.23	617.53	676.32	866.32	705.13	301.73	555.28	484.53	996.39	852.16	242.98
24.25	668.99	697.91	825.06	694.12	304.93	555.08	492.39	976.98	918.48	247.7
24.27	718.16	718.51	771.51	686.64	309.25	563.69	489.8	907.45	964.87	259.11
24.29	756.63	731.07	725.13	688.36	313.32	578.82	480.7	800.97	971.39	272.65
24.31	780.2	727.49	700.15	699.77	316.27	594.1	471.53	682.58	930.72	283.95
24.33	787.72	710.8	694.21	714.94	317.9	603.08	465.3	579.9	845.94	289.21
24.35	776.85	690.75	696.43	721	316.97	607.36	465.47	508.98	736.74	287.49
24.37	744.4	676.64	701.46	713.93	311.88	608.72	473.9	471.1	630.32	281.58
24.39	693.35	675.46	713.16	696.98	304.71	607.75	488.18	457.98	548.31	274.5
24.41	636.19	685.58	736.06	675.17	297.37	605.94	507.14	455.15	500.88	267.79
24.43	588.65	702.79	769.18	658.92	293.58	603.7	527.68	454.14	485.65	261.58
24.45	562.56	731.85	799.89	652.66	295.4	601.73	542.72	453.07	485.9	254.78
24.47	559.46	780.39	811.77	652.9	301.78	604.03	548.25	452.09	487.28	247.75
24.49	568.35	848.86	797.82	657.91	309.46	611.33	542.79	449.48	484.82	242.59
24.51	573.07	924.55	768.11	663.59	315.68	621.3	526.78	443.23	479.9	241.1
24.53	562.97	982.15	742.25	663.95	317.36	628.57	508.24	432.62	477.4	243.2
24.55	537.12	1000	734.49	659.01	314.82	627.73	496.75	422.69	481.18	246.54
24.57	505.16	976.09	745.66	650.6	308.75	619.32	495.74	420.29	486.31	248.41
24.59	480.97	929.1	764.31	642.78	302.63	609.88	504.18	429.03	485.83	248.56
24.61	472.94	884.75	773.19	642.15	299.06	608.3	515.74	444.38	478.47	250.04
24.63	480.79	861.75	767.15	649.01	299.73	620.53	519.59	458.21	467.16	256.73
24.65	498.36	867.04	752.44	657.94	303.96	642.45	511.97	463.71	458.4	268.88
24.67	518.23	892.22	737.22	664.2	308.71	662.93	496.18	459.49	457.98	283.29
24.69	535.65	922.88	726.55	664.88	309.33	672.3	478.09	450.13	466.37	295.04
24.71	548.43	945.22	718.87	663.39	305.8	665.83	464.23	442.23	477.16	300.85
24.73	552.71	947.39	708.02	668.09	299.2	649.24	458.26	439.37	485.18	302.39
24.75	545.95	925.4	695.41	680.17	293	632.29	457.7	442.92	487.92	303.85
24.77	530.11	887.63	686.22	694.35	290.76	623.56	459.59	449.33	485.36	306.37
24.79	512.36	845.41	685.32	701.57	293.4	627.24	462.25	451.87	479.51	309.24
24.81	501.44	811.54	692.85	691.09	298.41	642.53	464.39	446.41	475.51	310.55
24.83	503.7	791.84	705.78	660.23	304.41	665.21	464.07	432.21	473.04	308.96
24.85	514.42	781.91	720.11	620.91	308.57	691.84	460.5	414.16	471.42	306.23
24.87	525.39	773.17	733.6	590	307.99	716.32	453.76	402.2	470.05	305.12
24.89	529.38	758.78	743.81	581.82	302.89	737.41	444.88	401	466.73	304.6
24.91	524.73	737.1	749.42	599.86	295.99	760.37	438.49	408.36	460.55	302.43
24.93	514.22	713.97	747.91	634.42	290.26	792.8	438.32	418.83	455.81	296.46
24.95	502.05	695.64	743.58	665.58	290.83	840.9	443.36	424.5	453.99	285.69
24.97	487.55	684.18	742.55	681.75	297.89	903.6	451.02	423.29	456.58	272.73
24.99	471	678.13	747.54	682.09	305.09	963.63	455.99	419.52	463.9	262.4
25.01	452.95	673.15	753.93	671.61	306.99	1000	453.32	416.91	472.84	257.39
25.03	440.09	666.87	755.14	657.25	300.48	999.11	445.47	416.71	478.18	258.98
25.05	440.26	659.39	744.45	644.35	287.01	956.62	438	418.06	476.72	265
25.07	455.13	651.78	725.69	631.38	274.62	882.85	435.33	417.67	466.99	270.58

Sudut 2θ [deg]	Data Uji XRD Material Duralumin									
	Tembaga [%]					Tembaga [%]				
	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
25.09	479.91	644.17	708.37	622.19	268.64	797.11	439.51	415.88	453.5	272.44
25.11	504.05	637.47	700.29	621.35	268.62	714.99	443.98	415.16	444.01	269.86
25.13	515.06	633.14	703.87	628.49	272.38	650.49	442.45	418.63	443.84	264.3
25.15	511.45	632.1	720.82	637.88	276.02	611.62	434.97	426.31	451.37	259.4
25.17	499.17	634.4	745.71	639.28	277.13	594.89	426.2	432.95	458.95	257.21
25.19	484.73	637.41	771	625.81	277.36	593.42	422.28	433.53	459.59	257.29
25.21	476.77	637.31	786.69	603.01	277.46	597.26	425.19	426.07	453.96	258.27
25.23	476.65	633.94	779.95	582.93	277.07	596.38	428.01	411.3	447.67	258.21
25.25	481.52	631.08	748.7	575.59	276.68	589.09	426.52	397.15	445.92	255.17
25.27	490.14	631.9	707.15	582.49	276.32	578.07	420.12	390.56	449.22	248.81
25.29	499.68	640.34	671.21	595.34	275.67	566.48	412.95	391.07	452.61	240.41
25.31	505.34	654.01	652.11	606.17	275.47	559.02	411.62	398.67	452.38	231.91
25.33	506.66	665.84	648.58	612.39	275.34	556.74	416.51	409.22	450.85	225.94
25.35	503.57	671.88	648.11	618.08	275.17	556.74	423.5	416.6	451.2	224.05
25.37	500.1	672.33	644.92	626.11	276.81	556.01	429.72	421.55	454.44	225.8
25.39	499.48	667.02	645.33	633.58	280.81	551.01	431.96	424.2	458.28	229.43
25.41	501.63	660.96	656.22	635.81	285.6	540.8	431.5	421.83	457.47	232.83
25.43	504.21	657.04	678.9	630.26	289.26	527.95	430.99	415.75	449.38	234.54
25.45	505.6	653.52	705.16	618.65	288.37	516.66	427.41	406.17	438.33	234.9
25.47	505.69	651.09	723.31	608.76	281.88	512	420.38	394.08	430	234.41
25.49	505.28	651.09	728.79	604.53	272.74	516.17	410.11	386.28	430.23	234.63
25.51	498.42	649.48	729.87	603.5	263.35	526.91	399.1	388.17	441.11	236.25
25.53	479.96	646.1	734.38	604.71	256.24	541.72	394.9	399.78	458.21	238.48
25.55	451.24	644.53	743.71	607.8	254.71	555.1	401.26	416.54	472.24	240.44
25.57	421.9	645.85	752.18	613.75	258.77	560.29	413.96	430.78	477.04	241.51
25.59	407.16	651.68	750.95	623.35	267.35	556.62	428.27	433.61	470.52	240.57
25.61	417.12	661.22	734.76	631.97	277.41	545.24	436.12	424	457.37	238.12
25.63	444.22	665.53	711.5	630.45	282.97	530.56	434.02	408.48	445.21	234.49
25.65	474.58	657.13	690.52	613.87	280.82	522.49	426.59	394.93	438.31	230.4
25.67	493.98	638.49	680.2	585.17	273.39	525.61	419.23	389.02	433.04	226.58
25.69	497.03	615.48	684.19	553.82	264.96	536.85	415.65	392.51	426.02	223.7
25.71	488.6	596.81	697.8	533.21	261.33	552.18	418.63	399.66	416.8	222.2
25.73	478.12	591.26	712.56	534.53	264.54	563.02	424.49	406.14	409.97	221.91
25.75	468.54	599.58	724.68	557.02	272.25	563.64	427.73	410.45	411.72	221.94
25.77	464.44	616.11	731.88	588.53	280.64	555.52	426.98	411.47	424.06	222.21
25.79	466.07	636.56	736.55	614.08	286.1	541.97	422.31	408.48	440.62	221.66
25.81	474.43	654.24	740.95	620.77	285.39	529.13	416	401.03	452.56	219.9
25.83	488.34	663.52	742.57	609.1	278.48	525.67	412.82	389.08	453.87	218.35
25.85	503.95	663.94	736.14	591.44	266.69	532.34	415.09	376.6	445.26	218.29
25.87	511.08	658.12	718	579.47	254.49	545.47	421.11	370.34	432.13	220.68
25.89	505.75	649.42	692.11	577.98	247.15	557.21	429.53	373.93	422.3	225.87
25.91	488.2	643.76	669.89	586.13	247.46	560	436.49	384.63	420.94	230.83
25.93	467.71	642.75	659.96	597.73	254.07	555.17	437.79	396.15	427.14	232.04
25.95	454.16	643.8	663.58	607.72	262.86	549.14	432.84	402.34	436.73	228.42
25.97	453.78	644.17	673.29	612.57	268.1	542.92	425.29	399.95	445.12	221.23
25.99	461.95	643.52	677.96	608.97	267.64	535.8	418.6	394.35	448.36	214.61
26.01	471.46	641.59	679.11	596.78	263.13	523.19	415.74	391.71	446.83	213.01
26.03	476.44	642.15	688.82	581.41	258.05	505.22	416.3	394.01	443.79	216.77
26.05	476.55	646.15	713.99	570.45	255.72	492.33	416.01	399.49	440.8	223.34
26.07	474.47	651.72	753.02	568.32	256.85	494.04	410.3	402.34	438.13	228.53
26.09	473.41	657.1	789.36	572.45	259.65	510.22	400.62	395.62	435.2	229.43

Sudut 2θ [deg]	Data Uji XRD Material Duralumin									
	Tembaga [%]					Tembaga [%]				
	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
26.11	472.83	662.81	801.14	575.69	262.32	534.68	391.57	382.5	430.28	226.72
26.13	473.03	666.84	782.88	575.62	264.09	554.43	386.32	370.12	424.98	223.54
26.15	477.08	668.16	748.59	573.11	265.05	560.67	387.16	365.37	424.52	222.1
26.17	486.25	663.16	719.1	573.69	266.42	555.53	391.46	371.97	432.41	222.96
26.19	500.08	649.18	713.3	581.53	267.51	542.89	391.21	385.72	448.28	223.56
26.21	513.26	628.04	727.21	592.29	268.02	526.69	384.29	396.59	467.29	222.82
26.23	518.39	608.38	742.72	599.83	267.8	513.08	376.68	401.1	478.68	222.01
26.25	512.85	599.16	741.94	604.38	266.83	504.63	374.25	398.61	475.58	223.67
26.27	501.55	602.83	720.79	602.92	265.61	502.66	383.02	392.66	459.24	229.39
26.29	490.74	614.11	691.77	600.58	265.72	510	402.29	390.57	436.11	237.54
26.31	487.67	623.82	675.48	601.43	266.64	520.85	420.67	394.52	416.07	242.47
26.33	494.21	623.99	677.07	600.35	268.88	526.24	428.25	401.1	407.61	241.57
26.35	506.72	616.41	691.81	596.93	272.28	524.33	424.7	407.49	408.92	235.8
26.37	519.77	610.72	706.13	595.19	275.37	515.11	413.37	406.4	416.34	228.09
26.39	529	612.04	709.87	594.62	276.42	503.46	400.39	395.59	426.15	222.13
26.41	528.98	620.83	702.1	604.51	275.13	500.66	391.05	380.63	433.94	219.14
26.43	519.9	631.74	689.47	624.74	271.49	507.64	385.11	367.38	439.75	216.93
26.45	504.35	636.45	673.1	642.38	267.18	517.96	381.36	361.24	445.98	215.09
26.47	485	633.06	656.56	650.99	264.69	528.7	382.67	364.05	448.89	214.35
26.49	465.54	625.88	641.65	644.81	264.58	532.25	389.75	370.62	447.78	214.21
26.51	449.54	619.06	631.46	621.91	265.15	525.27	399.27	377.41	444.09	214.66
26.53	435.8	617.99	628.91	595.85	265.46	513.57	407.28	384.22	437.47	215.3
26.55	427.8	625.38	636.04	573.42	264.92	500.4	409.13	392.85	431.68	215.22
26.57	427.53	639.02	645.79	555.26	263.01	488.36	404.97	404.05	431.96	215.46
26.59	433.29	654.72	654.54	549.11	261.43	484.18	400.68	413.7	436.8	217.14
26.61	442.77	665.6	657.58	556.32	260.49	487.98	400.73	416.53	444.7	219.06
26.63	453.65	665.11	654	572.93	258.72	495.96	405.86	409.2	453.1	220.78
26.65	461.09	653.4	647.12	595.88	256.55	503.27	412.64	395.07	455.85	222.04
26.67	467.17	638.38	642.01	611.87	254.73	504.42	415.02	383.44	450.89	222.79
26.69	471.9	630.23	637.57	607.58	253.05	496.81	411.71	380.12	440.81	223.71
26.71	473.58	635.82	637.05	586.91	252.91	485.82	404.08	384.01	428.16	224.46
26.73	471.44	652.96	640.48	562.72	254.43	479.47	394.67	389.32	417.29	223.44
26.75	467.62	670.7	649.45	547.39	256.12	481.47	388.42	386.99	411.11	220.38
26.77	464.86	677.2	665.85	548.61	258.12	490.4	385.71	375.6	409.37	215.28
26.79	467.91	666.81	689.76	560.25	260.78	502.7	386.04	362.26	412.49	208.96
26.81	474.81	642.49	711.69	567.66	263.41	512.47	389.35	356.28	420.96	203
26.83	480.74	614.52	724.1	564.56	266.13	517.7	392.54	364.37	433.03	198.47
26.85	480.45	593.94	723.62	554.71	268.76	520.27	394.25	383.82	445.11	196.48
26.87	473.45	587.53	712.05	544.28	268.97	520.96	396.17	402.99	450.79	198.31
26.89	464	595.96	694.37	540.63	265.58	521.12	395.92	411.05	445.25	203.79
26.91	457.57	613.91	679.98	546.52	258.45	522.97	394.35	403.34	430.19	211.47
26.93	454.52	634.35	670.96	557.49	248.49	525.61	392.49	385.06	412.26	219.36
26.95	453.25	651.2	666.53	569.65	239.45	527.38	390.34	368.43	400.87	224.77
26.97	451.18	660.93	668.11	579.87	236.24	525.77	390.84	360.97	401.16	225.71
26.99	446.77	663.23	673.12	584.46	240.01	518.55	396.1	363.84	409.35	222.75
27.01	441.37	659.5	675.63	583.94	248.32	506.34	401.7	372.91	417.73	217.43
27.03	437.91	654.66	673.9	581.35	255.19	493.71	403.76	379.82	420.46	211.91
27.05	436.23	652.19	668.02	578.15	255.39	486.14	400.2	380.33	415.75	208.57
27.07	434.7	651.29	658.57	575.4	249.37	488.37	392.03	376.21	409.99	207.7
27.09	433.6	649.67	649.3	570.03	242.79	501.34	384.9	369.47	410	207.71
27.11	431.24	642.1	642.69	559.77	241.67	522.05	383.75	365.77	416.75	208.5

Sudut 2θ [deg]	Data Uji XRD Material Duralumin									
	Tembaga [%]					Tembaga [%]				
	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
27.13	428.62	625.81	638.03	546.3	247.26	541.27	387.11	369.38	427.01	209.74
27.15	430.65	609.01	635.74	533.96	254.39	549.83	390.44	376.73	435	211.52
27.17	438.47	598.96	639.53	526.59	256.75	544.53	390.83	383.27	434.32	214.05
27.19	450.39	599.14	649.13	526.48	252.67	530.38	387.93	384.39	424.88	215.71
27.21	464.24	608.83	658.04	529.61	245.2	518.44	384.73	377.16	411.79	213.32
27.23	472.79	619.64	659.09	533.74	239.52	519.64	385.21	367.52	401.12	207.26
27.25	472.62	624.97	646.69	535.44	237.84	533.18	389.97	363.42	398.14	198.93
27.27	466.8	626.07	620.79	531.42	237.98	549.73	396.12	366.88	404.65	191.54
27.29	457.73	624.35	591.76	521.29	236.04	561.48	401.86	376.38	416.23	189
27.31	449.76	621.49	572.79	510.46	230.74	564.69	406.46	383.79	424.43	192.3
27.33	444.97	616.28	567.52	504.71	223.33	561.47	410.02	380.85	423.24	199.36
27.35	440.55	605.09	576.9	511.98	216.75	558.33	412.34	367.53	411.87	208.79
27.37	434.91	587.49	595.19	530.67	214.07	555.66	411.57	351	395.99	216.41
27.39	429.55	565.99	611.67	550.39	217.38	550.09	403.66	342.24	386.5	219.81
27.41	425.15	545.18	620.3	560.8	225.4	544.19	388.63	350.86	390.16	218.49
27.43	424.59	530.53	620.8	559.38	235.18	539.15	371.87	375.38	403.59	212.49
27.45	426.09	523.76	613.56	551.07	243.88	535.66	361.63	404.12	418.8	204.77
27.47	424.81	525.84	607.64	545.89	248.47	536.05	362.58	421.78	426.84	199.29
27.49	416.5	535.45	608.34	547.4	247.62	536.85	374.01	417.58	424.78	196.76
27.51	402.05	548.31	614.62	552.93	243.11	533.88	387.17	392.15	419.45	198.03
27.53	387.45	560.4	621.18	556.9	236.3	530.35	393	359.54	416.85	201.15
27.55	382.67	568.13	622.54	553.66	228.62	526.65	388.74	337.53	418.75	203.5
27.57	391.11	569.31	617.81	543.9	224.38	523.31	378.77	336.5	424.58	205.14
27.59	409.39	566.84	613.4	531.46	225.93	521.9	368.51	356.02	428.98	205.49
27.61	427.72	564.38	615.28	522.19	232.53	520.74	363.26	384.65	428.44	204.21
27.63	436.32	565.03	624.52	522.96	243.08	518.67	362.24	405.86	425.02	203.02
27.65	432.79	568.47	633.2	532.65	253.77	517.86	360.61	412.71	419.57	202.03
27.67	422.82	572.14	633.93	542.22	259.83	517.69	355.88	409.34	412.9	202.48
27.69	411.68	573.4	625.2	544.27	261.36	517.44	350.29	402.8	407.32	206.25
27.71	404.51	570.25	611.57	534.17	258.67	515.44	347.16	400.02	402.88	211.77
27.73	402.52	562.64	603.11	519.82	251.26	510.94	350.73	402.68	399.31	216.26
27.75	402.8	552.39	605.86	513.91	242.2	505.35	360.9	404.72	399.39	217.71
27.77	404.14	539.74	616.45	520.38	234.02	501.47	371.29	402.67	404.24	214.33
27.79	406.83	528.81	628.74	534.2	227.76	500.33	376.76	399.82	410.65	207.66
27.81	408.53	524.24	633.83	545.02	226.21	500.63	376.76	398.38	415.68	202.39
27.83	408.74	525.36	626.45	542.26	229.27	498.7	372.94	398.84	417.29	201.1
27.85	407.86	528.98	610.08	529.46	233.44	494.3	368.62	400.82	414.85	202.77
27.87	406.29	530.01	592.54	515.83	237.52	491.16	366.01	400.92	413.57	205.25
27.89	406.63	524.26	582.02	508.65	240.3	493.61	363.15	397.64	417.62	205.18
27.91	410.69	516.03	583.92	513.36	240.31	502.76	359.49	396.3	423.99	201.03
27.93	418.47	512.33	595.04	526.64	239.31	515.22	357.14	399.08	427.63	196.33
27.95	428.48	516.1	608.17	538.05	238.91	524.68	357.81	403.61	424.68	194.49
27.97	437.81	524.79	617.54	544.51	238.47	527.04	360.35	405.17	414.54	195.85
27.99	444.76	531.73	620.84	544.7	238.34	523.38	364.6	398.48	402.38	199.85
28.01	448.43	530.64	619.48	538.22	239.08	515.24	369.35	381.95	393.08	203.91
28.03	447.84	521.24	616.8	532.89	239.66	503.61	373.89	362.93	388.44	205.66
28.05	444.96	507.42	615.02	530.47	241.05	489.7	378.95	349.41	386.7	206.07
28.07	440.97	495.22	616.05	527.32	244.23	475.89	383.46	346.95	385.18	206.64
28.09	435.7	488.79	621.7	526.94	247.71	466.45	382.63	354.61	382.38	207.6
28.11	431.22	490.83	632.49	528.25	250.33	465.55	377.07	366.52	377.73	209.1
28.13	428.55	500.61	646.94	527.11	252.97	472.08	368.73	375.09	372.69	209.87

Sudut 2θ [deg]	Data Uji XRD Material Duralumin									
	Tembaga [%]					Tembaga [%]				
	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
28.15	427.76	515.66	662.13	526.75	254.77	482.03	360.03	376.73	371.91	208.85
28.17	429.41	531.38	673.88	523.23	255.89	488.79	354.03	371.09	376.14	206.41
28.19	431.99	541.97	677.9	512.34	256.12	488.6	350.18	363.43	384.71	203.81
28.21	432.26	541.16	670.91	500.21	253.56	482.69	345.38	357.85	394.8	202.59
28.23	431.46	529.29	654.81	490.03	247.34	472.32	341.16	357.25	400.4	203.92
28.25	431.51	509.35	633.02	483.94	239.54	463.26	337.91	362.22	399.49	206.35
28.27	434.72	489	612.5	486.75	231.72	462.51	336.8	371.27	394.73	207.77
28.29	441.89	478.4	598.54	495.48	225.81	471.43	340.37	381.07	387.55	206.44
28.31	448.24	479.7	590.3	505.6	222.94	488.72	347.28	390.65	381.91	202.65
28.33	446.69	488.04	585.22	515.4	223.6	508.12	355.34	395.52	380.63	198.86
28.35	436.05	500.07	584.2	519.93	227.47	516.45	363.99	392.4	383.77	197.81
28.37	418.22	508.25	584.35	517.34	233.36	511.68	369.27	383.14	391.73	199.54
28.39	399.52	510.41	587.09	509.54	238.33	497.01	368.88	372.85	401.61	202.27
28.41	387.71	512.44	591.52	500.02	239.42	478.59	364.26	368.29	408.04	203.61
28.43	385	514.5	593.1	495.61	235.22	465.01	356.98	375.08	408.4	203.58
28.45	389.72	515.43	595.37	500.8	228.69	458.64	350.71	389	403.4	202.94
28.47	399	516.81	602.76	512.68	224.14	453.12	350.31	401.25	397.06	202.93
28.49	407.38	514.72	612.64	527.4	223.76	448.49	356.11	407.34	394.21	203.28
28.51	410.33	510.18	622.02	539.1	226.96	443.82	365.53	406.59	394.48	202.56
28.53	407.63	510.37	620.82	543.37	230.85	442.88	374.69	402.98	395.73	200.48
28.55	402.32	518.97	602.82	540.06	231.82	451.69	379.34	401.94	395.36	199.75
28.57	399.53	536.01	579.57	531.65	230.04	469.83	377.04	403.75	393.36	201.1
28.59	403.21	559.11	562.26	518.72	226.93	490.13	369.07	405.62	391.04	204.21
28.61	410.68	577.22	559.61	503.31	222.56	507.27	357.55	406.66	389.09	206.29
28.63	416.18	582.82	574.61	488.65	218.32	514.87	345.53	405.69	385.7	204.35
28.65	416.24	575.91	594.37	475.43	215.53	515.05	335.52	401.91	380.79	198.46
28.67	411.7	562.94	606.69	463.29	214.85	513.53	329.44	396.69	375.31	192.62
28.69	409.7	549.44	608.91	456.05	218.4	511.79	326.73	391.74	373.07	189.76
28.71	415.9	540.59	597.12	452.93	225.78	508.93	326.13	389.52	376.67	191.11
28.73	425.98	532.75	576.76	452.48	232.94	503.26	325.98	391.91	385.76	194.86
28.75	434.76	522.21	558.63	456.78	237.71	494.15	327.63	397.01	396.65	198.14
28.77	436.35	509.25	548.97	462.7	238.61	487.36	332.97	398.75	404	198.56
28.79	428.52	498.21	552.54	468.9	235.99	487.39	343.61	394	402.78	196.64
28.81	419.86	490.41	567.44	479.32	233.03	493.63	356.54	384.27	392.16	194.08
28.83	416.37	488.63	581.67	489.82	232.44	502.66	365.57	376.94	375.24	192.83
28.85	416.3	490.11	584.58	496.12	234.89	507.47	364.46	378.42	358.89	194.76
28.87	418.53	493.72	574.49	496.67	240.11	504.31	353.88	387.92	350.37	199.36
28.89	417.55	500.13	559.95	488.16	245.75	494.07	339.84	397.21	352.89	203.55
28.91	411.78	508.46	552.84	477.28	248.5	478.99	331.55	399.55	364.56	204.53
28.93	407.7	513.92	559.95	474.36	245.85	464.45	333.39	393.04	378.78	200.72
28.95	408.54	513.28	579.14	480.97	239.2	456.12	343.22	384.96	388.63	193.26
28.97	414.84	504.75	598.76	495.33	232.55	455.36	353.43	383.53	391.28	186.73
28.99	425.13	493.83	610.24	510.72	228.71	461.78	358.91	388.8	388.86	184.8
29.01	433.14	486.48	612.88	518.55	229.23	470.54	357.8	395.09	386.44	188.84
29.03	435.92	485.93	608.66	518.37	232.06	475.86	352.45	398.36	388.59	197.2
29.05	433.05	491.33	601.5	512.9	232.12	476.78	346.61	397.57	394.86	205.54
29.07	424.79	499.6	595.35	505.17	228.35	473.11	344.23	398.03	400.69	209.5
29.09	415.31	508.3	589.64	497.63	223.76	465.53	346.8	404.78	401.56	208.03
29.11	408.65	518.33	586.03	489.78	220.1	456.46	354.87	413.81	395.81	202.8
29.13	407.26	525.97	586.09	481.38	220.39	446.25	363.79	418.09	385.22	197.33
29.15	412.84	526.1	588.28	475.28	225.24	438.56	366.66	414.41	373.81	194.62

Sudut 2θ [deg]	Data Uji XRD Material Duralumin									
	Tembaga [%]					Tembaga [%]				
	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
29.17	421.83	516.19	589.94	475.97	230.67	437.81	359.35	404.41	364.91	195.04
29.19	428.65	499	591.05	487.9	233.86	442.2	344.03	394.59	358.35	196.69
29.21	430.7	481.27	593.55	507.57	235.37	448.71	327.17	391.68	353.74	198.05
29.23	427.44	473.59	600.41	524.59	233.9	453.98	316.71	395.62	350.16	198.43
29.25	421.28	479.45	608.45	528.27	230.44	453.91	315.06	403.34	347.43	197.99
29.27	416.1	494.96	608.13	514.84	227.31	452.37	319.3	411.1	345.87	198.11
29.29	412.16	513.1	589.58	492.48	224.46	452.5	324.71	415.86	346.21	199.35
29.31	408.15	527.13	552.33	475.91	222.46	453.1	329.39	415.4	347.7	201.62
29.33	404.62	530.64	511.51	473.11	224.51	454.26	332.72	408.07	349.9	204.2
29.35	403.59	525.14	488.83	481.95	229.58	454.87	336.42	394.32	351.57	204.95
29.37	408.05	515.75	495.76	491.94	234.85	453.83	341.53	379.64	353.97	201.76
29.39	419.45	507.79	528.45	493.4	237.93	455.51	345.63	370.39	357.15	195.37
29.41	434.38	504.61	569.59	485.43	236.19	459.83	344.64	371.22	360.34	188.23
29.43	444.98	506.08	597.84	475.26	230.38	464.95	338.51	381.51	362.8	184
29.45	445.28	507.19	605.28	470.26	226.29	467.98	328.58	394.04	363.38	184.62
29.47	435.17	506.41	596.66	474.03	227.37	465.27	320.57	400.5	362.16	188.3
29.49	419.05	507.59	579.99	483.54	232.8	457.18	320.14	397.35	364.01	191.33
29.51	404.58	513.52	562.93	493.31	239.73	446.8	326.71	385.17	371.06	191.87
29.53	398.37	522.28	550.53	498.79	243.87	436.27	334.8	366.91	379.97	190.32
29.55	399.62	527.45	542.52	499.15	243.12	429.8	340.87	348.21	385.51	189.02
29.57	405.35	521.13	538.91	493.36	239.78	426.77	342.3	334.85	382.28	189.92
29.59	413	503.57	541.33	481.7	236.41	426.32	340.92	329.8	368.54	192.66
29.61	417.98	484.39	548	464.72	232.99	430.61	340.3	334.94	352.71	194.52
29.63	419.27	473.46	553.35	446.42	229.48	438.43	341.37	349.44	345.09	193.56
29.65	418.22	475.14	556.3	434.73	225.31	448.35	341.26	366.05	348.28	189.46
29.67	413.62	484.95	555.04	437.37	220.95	459.67	338.45	378.71	360.43	183.57
29.69	406.67	495	548.85	456.18	218.28	467.14	331.8	385.19	375.12	178.35
29.71	400.32	500.01	543	487.44	218.52	468.32	322.95	385.44	381.31	176.62
29.73	395.28	498.59	541.26	518.29	220.53	464.77	316.46	383.67	376.45	178.21
29.75	394.83	493.32	541.45	536.17	223	457.35	315.18	384.86	364.54	182.05
29.77	401.53	488.49	544.18	535.37	224.42	449.73	316.74	387.93	349.49	186.61
29.79	412.79	486.01	544.66	516.33	224.89	445.7	318.71	389.01	339.64	189.84
29.81	422	487.68	539.11	487.45	225.14	446.22	318.6	384.42	342.34	190.4
29.83	422.33	491.72	531.38	461.98	226.06	451.9	317.8	372.98	354.06	190.17
29.85	409.67	494.53	529.11	445.03	227.89	459.76	320.74	357.94	369.37	189.71
29.87	387.77	493.74	534.57	435.48	229.48	465.55	328.26	344.99	381.87	189.62
29.89	366.41	490.42	548.19	428.88	229.69	467.52	335.79	337.78	383.33	190.7
29.91	355.75	487.42	561.72	420.49	229.16	464.88	338.34	336.98	373.69	192.02
29.93	357.6	488.62	566.13	410.49	228.39	460.03	333.69	343.15	360.65	192.22
29.95	367.73	494.25	558.57	405.55	228.08	458.47	325.75	355.55	349.37	192.75
29.97	378.55	502.24	547.65	408.67	228.42	460.62	320.88	370.6	345.74	193.12
29.99	382.31	506.95	541.03	418.94	227.13	467.08	321.99	382.93	352.29	192.81
30.01	375.14	505.64	544.31	432.97	223.4	475.69	325.52	386.57	362.67	191.75
30.03	360.95	496.87	554.87	448.37	219.28	479.97	325.66	378.99	369.93	189.32
30.05	345.23	482.65	563.92	463.46	217.16	474.95	320.92	366.48	370.77	185.99
30.07	335.53	467.27	561.71	477.07	218.62	461.85	312.76	358.03	363.24	183.93
30.09	338.82	456.2	550.09	484.78	222.4	445.07	306	358.4	352.29	183.49
30.11	354.08	450.88	535.45	481.16	223.63	435.5	304.55	367.34	345.92	184.67
30.13	372.01	452.72	525.16	462.49	219.9	439.11	305.5	378.83	346.53	185.85
30.15	385.56	459.22	525.31	433.72	212.65	452.68	304.28	385.87	352.99	186.03
30.17	389.52	468.78	535.29	405.88	205.89	464.2	301.17	387.22	362	185.44

Data sudut 2 θ Kode A1

Spesimen Sudut 2 θ	PDF Standard									
	Fasa	Sudut 2 θ	Fasa	Sudut 2 θ	Fasa	Sudut 2 θ	Fasa	Sudut 2 θ	Fasa	Sudut 2 θ
24,240	Al ₄ Cu ₃	24,826								
26,210	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	26,109								
30,145	AlCu ₃	30,691	Al ₂ O ₃	30,096						
40,785	AlCu ₃	40,375								
44,085	Al	44,988	CuAl ₂	44,259	Al ₂ O ₃	44,566				
45,220	CuO	45,294	AlCu	45,439	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	45,315	MgAl ₂ O ₄	45,049		
45,345	CuO	45,564	AlCu	45,439	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	45,315	MgAl ₂ O ₄	45,049		
49,370	CuAl ₂	49,267	Al ₂ O ₃	49,505	Al ₄ C ₃	49,919				
50,130	AlC ₃	50,064	Al ₄ Cu ₃	50,925	Cu	50,731	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	50,677		
50,920	AlC ₃	50,064	Al ₄ Cu ₃	50,925	Cu	50,731	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	50,677		
52,680	Al	52,455	AlCu	52,483	MgAl ₂ O ₄	52,506	AlCu ₃	52,539		
53,705	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	53,713								
55,480	CuAl ₂	55,566	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	55,817						
56,410	CuAl ₂	56,138	Al ₄ C ₃	56,533	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	56,141				
69,205	-									
77,580	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	77,230	Al	77,376	Al ₄ C ₃	77,150	MgAl ₂ O ₄	77,447		
77,800	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	77,516								
87,300	CuAl ₂	87,971	AlCu ₃	87,375	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	87,165				

Data sudut 2 θ Kode A2

Spesimen Sudut 2 θ	PDF Standard									
	Fasa	Sudut 2 θ	Fasa	Sudut 2 θ	Fasa	Sudut 2 θ	Fasa	Sudut 2 θ	Fasa	Sudut 2 θ
40,565	AlCu ₃	40,375								
44,975	Al	44,988	CuAl ₂	44,269	Al ₂ O ₃	44,566				
45,135	CuO	45,294	MgAl ₂ O ₄	45,049	AlCu	45,439	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	45,315		
49,340	CuAl ₂	49,267	Al ₄ Cu ₃	49,919	Al ₂ O ₃	49,505				
50,080	AlCu ₃	50,064	Cu	50,731	Al ₄ C ₃	50,925	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	50,77		
50,780	Cu	50,731	AlCu ₃	50,064	Al ₄ C ₃	50,925	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	50,77		
52,605	Al	52,455	AlCu	52,483	MgAl ₂ O ₄	52,506	AlCu ₃	52,539		
53,635	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	53,713								
55,770	CuAl ₂	55,566	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	55,817						
56,295	CuAl ₂	56,138	Al ₄ C ₃	56,533	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	56,141				
77,465	MgAl ₂ O ₄	77,447	Al	77,376	Al ₄ C ₃	77,150	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	77,516		
77,750	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	77,516	MgAl ₂ O ₄	77,477	Al	77,376	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	77,516		

Data sudut 20 Kode A3

Spesimen Sudut 20	PDF Standard									
	Fasa	Sudut 20	Fasa	Sudut 20	Fasa	Sudut 20	Fasa	Sudut 20	Fasa	Sudut 20
24,383	Al ₄ C ₃	24,826								
34,535	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	34,062	CuAl ₂	34,259						
45,165	MgAl ₂ O ₄	45,649	CuO	45,294	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	45,315	AlCu	45,439		
49,435	Al ₂ O ₃	49,505	Al ₄ C ₃	49,919	CuAl ₂	49,267				
50,975	AlCu ₃	50,064	Al ₄ C ₃	50,925	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	50,677				
52,610	AlCu ₃	52,539	AlCu	52,483	Al	52,455	MgAl ₂ O ₄	52,506		
52,745	AlCu ₃	52,539	AlCu	52,483	Al	52,455	MgAl ₂ O ₄	52,506		
53,860	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	53,713								
55,880	CuAl ₂	55,566	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	55,817						
56,465	CuAl ₂	56,138	Al ₄ C ₃	56,533	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	56,141				
62,780	Al ₂ O ₃	62,564	CuO	62,965	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	62,627				
67,640	CuAl ₂	67,454	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	67,029	AlCu ₃	67,359				
77,595	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	77,516	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	77,230	MgAl ₂ O ₄	77,477	Al ₄ C ₃	77,150	Al	77,376
77,820	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	77,516	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	77,230	MgAl ₂ O ₄	77,477	Al ₄ C ₃	77,150	Al	77,376
83,060	Al ₄ C ₃	83,864	MgAl ₂ O ₄	83,136	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	83,166				
88,305	Cu	88,840	MgAl ₂ O ₄	88,757	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	88,114				

Data sudut 20 Kode A4

Spesimen Sudut 20	PDF Standard									
	Fasa	Sudut 20	Fasa	Sudut 20	Fasa	Sudut 20	Fasa	Sudut 20	Fasa	Sudut 20
24,305	Al ₄ C ₃	24,826							24,305	Al ₄ C ₃
26,390	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	26,109							26,390	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe
34,635	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	34,062	CuAl ₂	34,259					34,635	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe
40,810	AlCu ₃	40,375	AlCu	40,133					40,810	AlCu ₃
45,295	AlCu	45,439	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	45,315	MgAl ₂ O ₄	45,049	CuO	45,294	45,295	AlCu
49,530	Al ₄ C ₃	49,919	CuAl ₂	49,267	Al ₂ O ₃	49,505			49,530	Al ₄ C ₃
50,160	AlCu ₃	50,064							50,160	AlCu ₃
50,995	Cu	50,731	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	50,677	Al ₄ C ₃	50,925			50,995	Cu
52,680	Al	52,455	AlCu ₃	52,539	MgAl ₂ O ₄	52,506	AlCu	52,483	52,680	Al
52,770	AlCu	52,483							52,770	AlCu
53,805	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	53,713							53,805	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe
55,890	CuAl ₂	55,566	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	55,817					55,890	CuAl ₂
56,390	Al ₄ C ₃	56,533	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	56,141	CuAl ₂	56,138			56,390	Al ₄ C ₃
60,340	AlCu ₃	60,848	CuO	60,450					60,340	AlCu ₃
69,235	-								69,235	-
77,835	Al ₄ C ₃	77,150	MgAl ₂ O ₄	77,447	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	77,516	Al	77,376	77,835	Al ₄ C ₃
83,005	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	83,166	MgAl ₂ O ₄	83,136	Al ₄ C ₃	83,864			83,005	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe

Data sudut 2 θ Kode A5

Spesimen Sudut 2 θ	PDF Standard									
	Fasa	Sudut 2 θ	Fasa	Sudut 2 θ	Fasa	Sudut 2 θ	Fasa	Sudut 2 θ	Fasa	Sudut 2 θ
20,580	AlCu	20,323								
24,275	Al ₄ C ₃	24,826								
26,285	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	26,109								
34,600	CuAl ₂	34,259	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	34,062						
45,105	MgAl ₂ O ₄	45,059	CuO	45,294	AlCu	45,439	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	45,315		
45,245	MgAl ₂ O ₄	45,059	CuO	45,294	AlCu	45,439	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	45,315		
49,500	Al ₂ O ₃	49,505	Al ₄ C ₃	49,919	CuAl ₂	49,267				
50,200	Cu	50,731	AlCu ₃	50,064	Al ₄ C ₃	50,925	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	50,677		
52,735	Al	52,455	MgAl ₂ O ₄	52,506	AlCu ₃	52,539	AlCu	52,483		
55,840	CuAl ₂	55,566	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	55,817						
56,430	CuAl ₂	56,138	Al ₄ C ₃	56,533	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	56,141				
77,540	Al	77,376	Al ₄ C ₃	77,150	MgAl ₂ O ₄	77,447	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	77,516		
82,935	CuAl ₂	82,472	Al ₂ O ₃	82,106	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	82,097	AlCu ₃	82,251	Al ₂ Cu ₃	82,398
88,465	Cu	88,840	MgAl ₂ O ₄	88,757	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	88,772				

Data sudut 2 θ , Kode W1

Spesimen Sudut 2 θ	PDF Standard									
	Fasa	Sudut 2 θ	Fasa	Sudut 2 θ	Fasa	Sudut 2 θ	Fasa	Sudut 2 θ	Fasa	Sudut 2 θ
24,115	Al ₄ C ₃	24,826								
40,570	AlCu	40,133	AlCu ₃	40,375						
42,275										
45,015	CuO	45,294	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	45,315	AlCu	45,439	MgAl ₂ O ₄	45,049		
47,080	AlCu ₃	47,139								
49,300	CuAl ₂	49,267	Al ₂ O ₃	49,505	Al ₄ C ₃	49,919				
49,955	CuAl ₂	49,887	Al ₂ O ₃	49,505	Al ₄ C ₃	49,919				
52,450	Al	52,455	AlCu ₃	52,539	AlCu	52,483	MgAl ₂ O ₄	52,506		
55,585	CuAl ₂	55,566	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	55,817						
56,205	CuAl ₂	56,138	Al ₄ C ₃	56,533	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	56,141				
72,945	CuAl ₂	72,763	CuO	72,887	Al ₄ C ₃	72,241				
77,425	Al	77,367	MgAl ₂ O ₄	77,447	Al ₄ C ₃	77,150	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	77,516		
77,625	Al	77,367	MgAl ₂ O ₄	77,447	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	77,516	Al ₄ C ₃	77,150		
85,695	Al ₂ O ₃	85,093	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	85,700						
88,115	Cu	88,840	Al ₈ Si ₆ Mg ₃ Fe	88,114	MgAl ₂ O ₄	88,757				