



UNIVERSITAS INDONESIA

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

SKRIPSI

REZA SEPTIAN

0706268846

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

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Reza Septian
NPM : 0706268846

Tanda Tangan : 

Tanggal : Juni 2011

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Reza Septian
NPM : 0706268846
Departemen : Teknik Metalurgi dan Material
Judul Skripsi : Porositas Penyusutan Paduan Duralumin
Pada Pengecoran Sistem Vakum

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof. Dr. -Ing. Ir. Bambang Suharno (.....)
Penguji : Dr. Ir. Donanta Dhaneswara M.Si (.....)
Penguji : Deni Ferdian, ST, M.Sc (.....)
Penguji : Ir. Wahyono, MT.Met (.....)

Ditetapkan di : Depok
Tanggal : 24 Juni 2011

KATA PENGANTAR

Indah pada waktunya, itulah sepeggal kalimat yang sering penulis ucapkan untuk menjadi sugesti dan penyemangat bagi diri sendiri selama penulis berkuliah dan menyusun skripsi. Atas indahnya waktu-waktu yang telah penulis alami, puji dan syukur penulis panjatkan kepada sang pemilik waktu dan semesta alam yaitu Allah Subhaanahu Wa Ta'ala atas segala rahmat dan karunia nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul **“Porositas Penyusutan Paduan Duralumin Pada Pengecoran Sistem Vakum”** sebagai salah satu persyaratan akademis guna memperoleh gelar Sarjana Teknik di Departemen Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Every time we remember to say “thank you”, we experience nothing less than heaven on earth. Berdasarkan kata-kata mutiara yang penulis kutip tersebut, kalimat se-sederhana “terima kasih” ternyata dapat memiliki efek yang dahsyat, hal ini membuat penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak di bawah ini yang tanpa bantuan dari mereka semua maka akan terasa sangat sulit bagi penulis untuk menyelesaikan skripsi ini:

1. Prof. Dr. Ing. Ir. Bambang Suharno, sebagai Pembimbing Skripsi, dan Ketua Departemen Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
2. Dr. Ir. Donanta Dhaneswara M.Si, sebagai Tim Penguji.
3. Deni Ferdian, ST, M.Sc, sebagai Tim Penguji dan Pembimbing Simulasi *Software Z-Cast*
4. Dr. Ir. Wahyono, MT, sebagai Tim Penguji dan Pembimbing Skripsi
5. Dr. Ir. Winarto, M.Sc, sebagai Pembimbing Akademik
6. Seluruh staf pengajar dan Teknisi di Departemen Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
7. Ayah, Ibu, Kakak, dan saudara serta keluarga yang senantiasa memberi dukungan.
8. Jaul, teman imajinasi dan diskusi pemenuhan kebutuhan berpikir yang saya temukan di awal perkuliahan
9. Kesabaran diri saya yang senantiasa menahan saya dari gejolak amarah saat pusing mengerjakan skripsi.

10. Abdurahman Alatas, rekan tugas akhir yang mendapat nilai A- (Ouch!) dan juga teman sepermainan sejak di SMA yang menyebabkan saya dan orang lain harus bekerja lebih keras jika berada dalam satu tim dengannya.
11. Arri Prasetyo si pria unik berelemen kegelapan super-ngarep yang senantiasa berbohong untuk memenuhi kebutuhan berpikirnya (*socio-path*). Semoga cepat dapat pacar, lae!
12. Arya Pradipta si bocah Tegal yang penuh kejutan, sohib mistis & klenik saya sedari semester awal perkuliahan. Tegal OMG-WTF-IMBA-OWNAGE!!!1111!!!!one!!one!!1!! (salam sejahtera untuk keluarga di rumah, wes teko dik!)
13. Benny “The Dragon” Yarlis si entitas terkuat : Half-human, half-dragon, and half-Benny, teman yang membanggakan. Terima kasih karena telah bersedia menjaga atmosfer bumi dari asteroid dan serangan para alien. Konon, air mata Benny dapat menyembuhkan kanker dan AIDS sekalipun, tetapi sayang sekali Benny tidak pernah menangis!.
14. Perkumpulan Pria-Kelamaan-Mikir, yang diketuai oleh alay yang paling lama mikirnya : Bastian a.k.a Bastijom a.k.a Raja Game a.k.a Omen 666 a.k.a Mulut Anak Setan a.k.a The False Messiah si kompetitor no.1 (pundak kanan saya sudah siap!), dan para anggota perkumpulan yang super bacot : Adhi Mukmon a.k.a Lemur a.k.a Kukang si bacot cool no.1, David Bercel dan Lendi Arief si bocah pemabuk tukang maen stik PS, Dika si pria hebat dan jago break dance (Asbun no.1), Andra “The Real 4l4Y” Herdiaz si kroco DotA dan jago Rohan, Umar “Ayam” Geronimo si legenda kalkulus (Indian-freak), Kenejid Pangaribuan a.k.a bibi lung si seniman dari tanah batak (ini bukan jokes!), Rangga perbunc si freak yang teriak freak!, Halwan “asbun no.2” Jaya si Donnie Yen dari Lampung (kompetitor no.2), Bang Zulfahmi si kompetitor terkuat (ayo semangat!), Farhan Trigondo si jamban portable calon bos WIKA (kroco dota), Hendro “steroid-infused” si cyborg.
15. Rekan-rekan “Mendadak-Futsal” saya: Iswanto si predator tipe X25C, Rivan si predator tipe X25D, Ical si penyayang binatang, Oky Simbolon si jago SolidWorks, Ardianto dan Basri si ahli surga, Ojik si “Bayar bayar ae”, Ruli si Al Pacino dari Minang, Fahmi a.k.a Pahmi si tendangan halilintar (Orang gila!), Kakang si jago putsal, Fariz si Ariel-Aussie (TA nya susah!), Dito a.k.a Ronaldito si kiper maju-maju (ngeselin), Roni si manusia rajin KP,

- Redian si “Waste and Garbage Disposal System”, Diwang si tendangan peledak tapi ga jago, Haris si bos Bendum FTUI ter-dewa sepanjang sejarah.
16. Hendy Setiawan si Potter-Freak, teman les dan teman bisnis pulsa yang sangat sabar dan pendengar yang baik.
 17. Teman-teman bermain ECO : Delfi “Bella” Ardi si super hode, Ai gendut si kotoran yang maunya di-GB, Wildan yang bersabar di posses Ai!(hidup posses!)
 18. Seluruh Teman-teman angkatan Metalurgi 2007 lainnya atas lawakan-lawakan segar setiap harinya.
 19. Teman-teman guild R.I.P yang freak: Yusuf si donator a.k.a ScatzhYusuf, bang Beni a.k.a Bestboy, cici Egie “Ladyzhee”, Jessica “Quameler” si kaleng rombeng, Neneng si ember bocor halus, bang Adam si OP magabut, dan bocah-bocah lainnya yang saya kurang peduli.
 20. Dia yang saya tidak mau sebutkan.
 21. Ibu Cece yang senantiasa berjualan nasi uduk setiap pagi sehingga saya tidak kelaparan.
 22. Tokoh Sheldon Cooper, Howard Wolowitz, Leonard Hofstadter dan Rajesh Koothrapali dalam film serial “Big Bang Theory” atas lawakan-lawakan yang membuat saya tertawa sendirian. Bazinga!
 23. Chuck Norris! Ampun, om Chuck!
 24. Semua pihak lainnya yang turut serta mensukseskan skripsi saya.
 25. Anda yang sedang membaca skripsi ini.

Semoga Allah Subhaanahu Wa Ta’ala memberikan balasan kebaikan kepada semua pihak yang telah membantu penelitian ini dan semoga hasil penelitian ini bermanfaat bagi siapa saja yang membacanya.

Depok, 24 Juni 2011



Penulis

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

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

Nama : Reza Septian
NPM : 0706268846
Departemen : Metalurgi dan Material
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada Tanggal : 24 Juni 2011

Yang Menyatakan



(Reza Septian)

ABSTRAK

Nama : Reza Septian
Program Studi : Metalurgi dan Material
Judul : **Porositas Penyusutan Paduan Duralumin Pada Pengecoran Sistem Vakum**

Duralumin yang merupakan paduan aluminium-tembaga banyak diterapkan pada industri pesawat terbang karena performan yang baik seperti ringan, kekuatan tinggi, ketahanan korosi yang tinggi, konduktivitas listrik yang baik, ketangguhan dan ketahanan fatik yang tinggi, dan mampu diberi perlakuan panas. Akan tetapi pemaduan aluminium dengan tembaga menyebabkan turunnya mampu alir duralumin yang menyebabkan material ini menjadi rentan akan porositas gas dan porositas penyusutan. Pada Penelitian ini, tungku pengecoran sistem vakum dengan cetakan permanen yang dipanaskan hingga mencapai 300°C digunakan untuk mencetak spesimen berbentuk roda yang mempunyai ketebalan 5, 7.5, 10, 10.5, 12.5, 15 mm. Dari beberapa percobaan pengecoran, tembaga ditambahkan dengan variasi kadar 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5 wt% dengan pemvakuman yang memiliki tekanan peleburan sebesar 40 cmHg dan tekanan solidifikasi sebesar 30 cmHg. Karakterisasi untuk meneliti distribusi, jenis, bentuk, dan kuantitas dari porositas penyusutan dilakukan dengan *software* simulasi Z-Cast, uji mikrostruktur, dan uji densitas. Hasil pengujian mikrostruktur menggunakan mikroskop optik dan *software* simulasi Z-Cast menunjukkan porositas penyusutan terkonsentrasi pada bagian dalam tengah produk. Hasil uji kuantitas memperlihatkan seiring dengan peningkatan tebal spesimen dan penurunan kadar tembaga, maka porositas (gas dan penyusutan) cenderung semakin sedikit.

Kata kunci : Duralumin, Porositas Penyusutan, Pengecoran Sistem Vakum, Cetakan Permanen, Simulasi *Software*, Z-Cast

ABSTRACT

Name : Reza Septian
Study Program : Metallurgy and Material
Title : *Shrinkage Porosity of Duralumin Alloys in Vacuum Casting System*

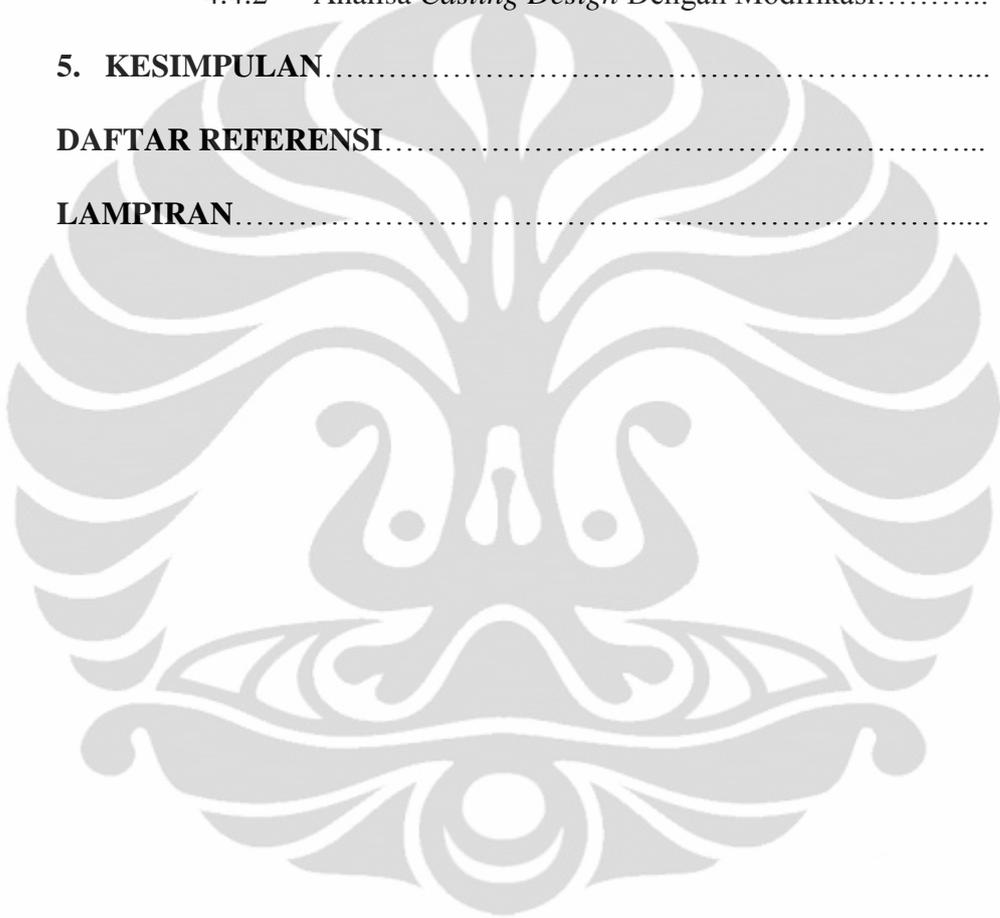
Duralumin as an aluminium-copper alloys have been applied mostly in the aircraft industry due to the light, high strength, high corrosion resistance, decent electrical conductivity, high toughness and fatigue resistance, and heat-treatable. However, by alloying aluminium with copper caused the material becomes vulnerable to gas and shrinkage porosity. On this research, vacuum casting system with permanent mold which heated to 300° C was used to cast round-shape specimens with 5, 7.5, 10, 10.5, 12.5, 15 mm in thickness. For a several of experiments, copper was added in variations of 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5 wt% and vacuuming process was adjusted continuously under the melting pressure by 40 cmHg and solidification pressure by 30 cmHg. Several tests to observe distribution, type, shape, and quantity of shrinkage porosity were conducted by simulation software Z-Cast, microstructure test, and density test. The results of microstructure test which conducted by using optical microscope showed that shrinkage porosity were concentrated on the inner-centre of the specimen. Moreover, the results of quantity test showed that by the increased of the specimen's thickness and by the decreased of the Cu wt%, then the porosity (gas and shrinkage) tends to be more slightly.

Keywords : *Duralumin, Shrinkage Porosity, Vacuum Casting System, Permanent Mold, Software Simulation, Z-Cast.*

DAFTAR ISI

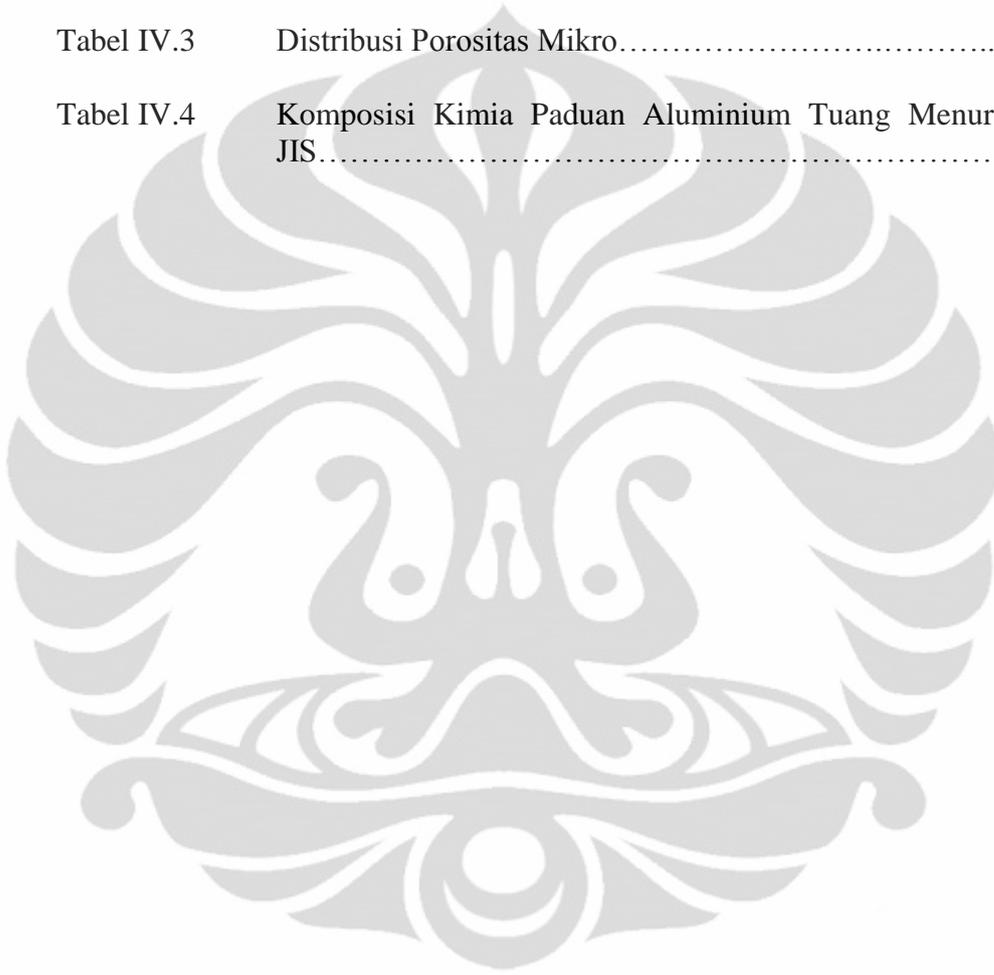
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH.....	vii
ABSTRAK.....	viii
ABSTRACT.....	ix
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xv
1. PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan.....	2
1.4 Ruang Lingkup Penelitian.....	2
1.3.1 Material.....	3
1.3.2 Parameter Penelitian.....	3
1.3.2 Pengujian yang Dilakukan.....	4
1.5 Sistematika Penulisan.....	4
2. TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Aluminium dan Paduannya.....	5
2.2 Duralumin.....	6
2.2.1 Karakteristik Duralumin dan Pengaruh Unsur Paduannya.....	7
2.3 Tungku Pengecoran Sistem Vakum	9
2.4 Solidifikasi	10
2.4.1 Nukleasi.....	10
2.4.2 Solidifikasi Logam Paduan.....	10
2.5 Porositas.....	13
2.5.1 Porositas Gas.....	14
2.6.2 Porositas Penyusutan.....	15
2.6 Software Z-Cast V2.6.7.....	16
3. METODOLOGI PENELITIAN.....	18
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	18
3.2 Alat dan Bahan.....	18
3.3 Prosedur Penelitian.....	19
3.3.1 Pengecoran Spesimen Menggunakan Tungku PSV... ..	19
3.3.2 Persiapan Sampel.....	20
3.3.3 Pengujian Mikroskop Optik.....	22
3.3.4 Pengujian Densitas.....	22
3.3.5 Simulasi Z-Cast.....	23

4. PEMBAHASAN	26
4.1 Analisa Produk Hasil Coran.....	26
4.2 Analisa Porositas.....	29
4.2.1 Analisa Distribusi Porositas.....	29
4.2.2 Analisa Jenis dan Bentuk Porositas.....	33
4.3 Analisa Kuantitas Porositas.....	36
4.4 Analisa Simulasi Software Z-Cast	38
4.4.1 Analisa <i>Casting Design</i> Eksperimen.....	38
4.4.2 Analisa <i>Casting Design</i> Dengan Modifikasi.....	45
5. KESIMPULAN	49
DAFTAR REFERENSI	50
LAMPIRAN	53



DAFTAR TABEL

Tabel II.1	Sistem Penamaan Aluminium Tuang	6
Tabel IV.1	Unsur-unsur dalam logam duralumin yang digunakan	26
Tabel IV.2	Distribusi Porositas Makro.....	30
Tabel IV.3	Distribusi Porositas Mikro.....	31
Tabel IV.4	Komposisi Kimia Paduan Aluminium Tuang Menurut JIS.....	43



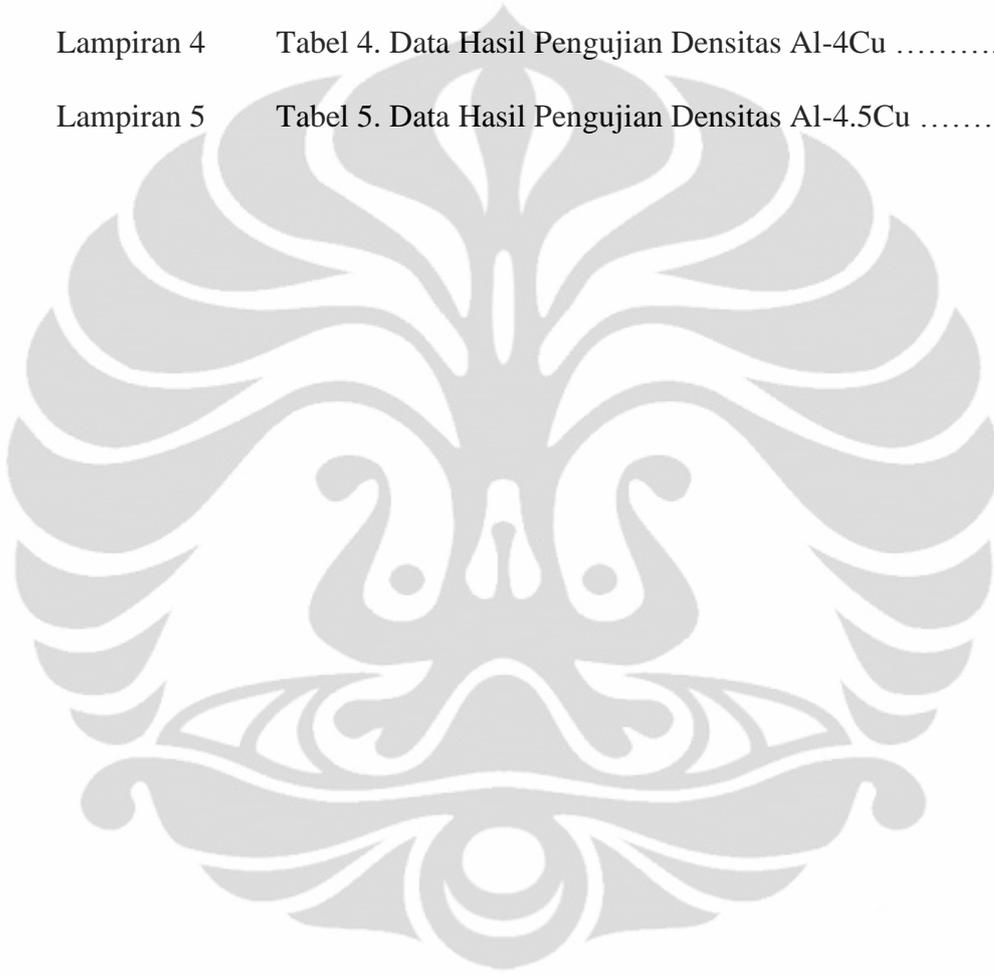
DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Diagram Fasa Biner AlCu	8
Gambar 2.2	Diagram Fasa Biner AlCu (diperbesar).....	8
Gambar 2.3	Skema Pengecoran Sistem Vakum.....	9
Gambar 2.4	Kolumnar Dendrit.....	11
Gambar 2.5	Dendrit <i>Equiaxed</i>	12
Gambar 2.6	<i>Mixed Growth</i>	13
Gambar 2.7	Ilustrasi Terperangkapnya Gelembung Sehingga Mengakibatkan Porositas.....	15
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian.....	18
Gambar 3.2	Dapur Induksi (pengecoran sistem vakum).....	20
Gambar 3.3	Cetakan Permanen (baja karbon rendah).....	20
Gambar 3.4	Mikroskop Optik.....	22
Gambar 3.5	Desain Produk 3D (Solidworks 2010). Tampak Isometric	23
Gambar 3.6	Desain Produk 3D (Solidworks 2010). Tampak Atas.....	23
Gambar 3.7	Desain Produk 3D (Solidworks 2010). Tampak Samping	24
Gambar 3.8	<i>Mesh Generator</i>	24
Gambar 3.9	Pengaturan <i>T.pour</i> dan <i>T.mold</i>	25
Gambar 4.1	Produk Cor (utuh) tampak atas dan samping	27
Gambar 4.2	Produk Cor (setelah dipotong secara vertikal).....	28
Gambar 4.3	Produk Cor Al4.5Cu (ketebalan 5 mm).....	28
Gambar 4.4	Produk Cor Al4.5Cu (ketebalan 10 mm).....	28
Gambar 4.5	Produk Cor Al4.5Cu (ketebalan 15 mm).....	29
Gambar 4.6	Porositas Penyusutan Pada Produk Cor Al4.5Cu (tebal :	

	15 mm) M:200x, Etsa: KMnO ₄ +HF+NaOH (color etching).....	34
Gambar 4.7	Porositas Gas Pada Produk Cor Al ₄ Cu (tebal : 10 mm) M:100x, Etsa: Keller's Reagent.....	35
Gambar 4.8	Porositas Gas & Penyusutan Pada Produk Cor Al _{4.5} Cu (tebal : 15 mm) M:200x, Etsa: KMnO ₄ +HF+NaOH (color etching).....	36
Gambar 4.9	Ilustrasi sederhana untuk membedakan porositas penyusutan makro dan mikro.....	37
Gambar 4.10	Produk Cor dengan denga ketebalan 15 mm (sampel uji densitas).....	38
Gambar 4.11	Grafik Ketebalan Produk Cor VS Porositas Rata-Rata	39
Gambar 4.12	Desain 3D Produk tampak isometrik dan atas. Skala dalam millimeter.....	39
Gambar 4.13	Hasil Simulasi Software Z-Cast (<i>Module Solidification – Shrinkage</i>).....	41
Gambar 4.14	Produk Cor dengan ketebalan 12.5 mm dan 15 mm yang dibelah vertikal (<i>Module Solidification – Shrinkage</i>).....	41
Gambar 4.15	Shrinkage Pada Produk Cor dengan ketebalan 12.5 mm dan 15 mm yang dibelah horizontal (<i>Module Solidification – Shrinkage</i>).....	41
Gambar 4.16	Hasil Simulasi Software Z-Cast (<i>Module Solidification – Temperature</i>).....	42
Gambar 4.17	Hasil Simulasi Software Z-Cast (<i>Module Solidification – Shrinkage</i>). <i>Shrinkage : 4%</i>	44
Gambar 4.18	Desain 3D Produk tampak isometrik dan atas. Skala dalam millimeter.....	45
Gambar 4.19	<i>Module Solidification-Shrinkage</i> (variasi <i>casting design</i>)	46
Gambar 4.20	<i>Module Solidification-Temperature</i> (variasi <i>casting design</i>).....	46
Gambar 4.21	<i>Module Solidification-Temperature</i> (desain awal).....	47

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Tabel 1. Data Hasil Pengujian Densitas Al-2.5Cu.....	53
Lampiran 2	Tabel 2. Data Hasil Pengujian Densitas Al-3Cu	54
Lampiran 3	Tabel 3. Data Hasil Pengujian Densitas Al-3.5Cu	55
Lampiran 4	Tabel 4. Data Hasil Pengujian Densitas Al-4Cu	56
Lampiran 5	Tabel 5. Data Hasil Pengujian Densitas Al-4.5Cu	57



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Paduan aluminium memegang peranan penting dalam berbagai industri, beberapa diantaranya adalah industri pesawat terbang komersial dan industri otomotif^[1]. Aluminium dipilih karena ringan, mudah di bentuk, dan dapat mencapai karakteristik tertentu (ulet, *strength-to-weight* ratio yang tinggi, tahan korosi, dan lain-lain) jika dipadukan dengan unsur yang bersesuaian guna mendapatkan karakteristik material yang diinginkan.

Duralumin merupakan paduan aluminium dengan kandungan unsur Cu yang berkisar antara 2.5% - 4.5%, biasanya ditambahkan Mn dan Mg tetapi tidak melebihi dari kadar 1%^{[2][3]}. Duralumin memiliki karakteristik material yang ringan, *strength-to-weight* ratio yang tinggi, ketahanan korosi yang tinggi, konduktivitas listrik yang baik, ketangguhan dan ketahanan fatik yang sangat tinggi, dan mampu diberi perlakuan panas^{[2][4]}. Hal ini yang menyebabkan duralumin banyak diaplikasikan pada industri pesawat terbang komersial dan industri otomotif^[1].

Akan tetapi, pemaduan aluminium dengan tembaga (Cu) menyebabkan turunnya mampu alir (*fluidity*) dari duralumin sehingga menyebabkan paduan ini memiliki rentang *feeding* (waktu pengisian) yang lama dan mampu tuang (*castability*) yang rendah^[5]. Rentang *feeding* yang panjang dan *Castability* yang buruk dapat memicu munculnya cacat-cacat pada produk coran, antara lain porositas.

Porositas sendiri dibagi menjadi *gas porosity* dan *shrinkage porosity*. Hal yang membedakan dari kedua jenis porositas tersebut adalah penyebab terjadinya porositas itu sendiri. Porositas gas adalah cacat yang terjadi karena adanya gas yang terperangkap dalam logam cair atau cetakan pada waktu penuangan. Penyebab dari porositas adalah gas terbawa dalam logam cair selama pencairan, gas terserap dalam logam cair dari cetakan, reaksi logam induk dengan uap cair dari cetakan dan juga terjadi turbulen sisa penuangan logam cair.^[6]

Porositas merupakan salah satu dari masalah yang sering dijumpai pada proses pengecoran^[7]. Porositas tentu harus diminimalisir karena porositas adalah

suatu cacat (*void*) yang dapat menurunkan kualitas produk coran. Pengecoran sistem vakum dapat menjadi salah satu cara untuk mereduksi cacat porositas pada pengecoran duralumin. Keuntungan dalam pengecoran sistem vakum adalah dapat meningkatkan sifat mekanis, meminimalisir cacat porositas penyusutan, serta biaya pembuatan peralatan pengecoran sistem vakum yang relatif murah (sekitar U.S \$1000).^[8]

1.2 Perumusan Masalah

Masalah yang akan dikaji dalam penelitian ini adalah bagaimana kuantitas, distribusi, jenis, serta bentuk dari cacat porositas secara umum dan porositas penyusutan secara khusus pada paduan duralumin yang merupakan hasil pengecoran sistem vakum.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk :

1. Mengamati porositas dan proses solidifikasi
2. Mengetahui distribusi porositas pada produk cor hasil eksperimen
3. Mengetahui pengaruh ketebalan produk terhadap cacat porositas yang terjadi
4. Mengetahui pengaruh penambahan %wt Cu (2.5, 3, 3.5, 4, 4.5) terhadap cacat porositas yang terjadi
5. Memprediksi lokasi terjadinya porositas penyusutan dengan bantuan simulasi *software* menggunakan Z-Cast
6. Mempelajari pengaruh variasi *gating system* terhadap cacat porositas penyusutan yang terjadi

1.4 Ruang Lingkup Penelitian

1.4.1 Material

Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah paduan duralumin (paduan aluminium seri 2xxx) dengan komposisi Cu 2,5-4,5%wt serta Mn dan Mg < 1%wt.

1.4.2 Parameter Penelitian

- Temperatur tuang duralumin : 700° C (*superheat* 50 °C)

- Temperatur solidifikasi : 548° C
- Temperatur *mold* : 300° C.
- Tekanan *melt* : 40 cmHg
- Tekanan solidifikasi : 30 cmHg
- *Permanent mold* berbahan *low carbon steel*.
- Duralumin dengan komposisi Cu sebesar 2.5 wt% Cu, 3 wt% Cu, 3.5 wt% Cu, 4 wt% Cu, 4.5wt% Cu.
- Variasi ketebalan produk cor : 5 mm, 7.5 mm , 10 mm, 12.5 mm, 15 mm.
- Variasi desain : desain awal produk, desain produk dengan variasi penambahan *runner*
- Porositas.

1.4.3 Pengujian yang Dilakukan

- Uji metalografi: pengujian ini dilakukan untuk mendapatkan struktur mikro porositas dari produk cor hasil eksperimen dan untuk mendapatkan distribusi porositas (dilihat dengan bantuan mikroskop optik).
- Uji OES: pengujian ini dilakukan untuk validasi komposisi kimia produk coran
- Uji Densitas: penghitungan kadar porositas produk cor hasil eksperimen.
- Simulasi pengecoran menggunakan Z-Cast: memprediksi lokasi dan distribusi terjadinya porositas.

1.5 Sistematika Penulisan

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

Bab 1 : Pendahuluan

Bab ini membahas mengenai latar belakang penelitian, perumusan masalah, tujuan penelitian, ruang lingkup penelitian, dan sistematika penulisan.

Bab 2 : Tinjauan Pustaka

Bab ini membahas mengenai aluminium dan paduannya, literatur mengenai porositas, serta membahas mengenai *software* Z-Cast sebagai alat simulasi pengecoran.

Bab 3 : Metodologi Penelitian

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

Bab 4 : Hasil dan Pembahasan

Bab ini berisikan hasil/data dari penelitian beserta analisa dari hasil penelitian tersebut.

Bab 5 : Penutup

Bab ini berisikan kesimpulan akhir dari hasil penelitian yang telah dilakukan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Aluminium dan Paduannya

Aluminium merupakan unsur yang banyak ditemukan di kerak bumi dan merupakan unsur ketiga yang paling melimpah setelah oksigen (O) dan silikon (Si). Kelebihan aluminium dibandingkan logam lainnya adalah aluminium memiliki berat jenis yang rendah sehingga membuat material ini menjadi ringan dan memiliki ketahanan korosi yang baik karena fenomena pasivitas^[9]. Penambahan unsur lain kerap kali dilakukan terhadap aluminium agar didapatkan sifat mekanis dan meningkatkan kegunaannya secara umum. Berikut ini beberapa sifat lain yang diinginkan dalam paduan aluminium^[4]:

1. Ketahanan korosi
2. Sifat fluiditas yang baik: dapat mengisi bagian yang tipis.
3. Temperatur lebur yang cukup rendah (650°C-760°C): meminimalisir energi peleburan
4. Sifat mekanis lainnya: bergantung pada variasi paduan unsur lain atau perlakuan panas. Beberapa sifat paduan aluminium bahkan dapat dibandingkan dengan besi tuang ataupun baja berkekuatan rendah
5. Tidak beracun: dapat digunakan untuk peralatan dapur
6. Konduktivitas listrik yang baik
7. Mudah dilakukan pemesinan

Akan tetapi aluminium tuang juga memiliki beberapa sifat yang tidak diinginkan (kelemahan), beberapa diantaranya adalah^[4]:

1. Mudah berikatan dengan gas terutama hidrogen pada kondisi cair, sehingga dapat memicu porositas.
2. Penyusutan yang terjadi saat proses pembekuan cukup tinggi (6%)
3. Berat jenis rendah: aluminium mudah tercampur dengan kotoran (oksida) Al_2O_3 yang memiliki berat jenis yang hampir sama.
4. Paduan aluminium setiap satuan berat cenderung lebih mahal daripada besi tuang ataupun beberapa jenis baja.

Terdapat 5 unsur paduan aluminium komersial (berdasarkan tingkat kelarutan padat maksimum unsur paduan) yaitu seng, magnesium, tembaga,

silikon dan mangan. Dalam pemaduan unsur-unsur tersebut terdapat batasan kadar karena jika berlebih maka akan mengganggu sifat utama dari aluminium itu sendiri.

Tata nama aluminium tuang yang dikeluarkan oleh *Aluminium Association* (AA) menggunakan sistem 4 digit. Terdapat 9 klasifikasi aluminium tuang berdasarkan jenis paduannya, dapat dilihat pada tabel 2.1 di bawah ini:

Tabel 2.1 Sistem Penamaan Aluminium Tuang^[10]

Seri	Unsur Paduan Utama
1xx.x	Aluminium murni ($\geq 99\%$)
2xx.x	Tembaga (Cu)
3xx.x	Silikon + Tembaga / Magnesium
4xx.x	Silikon (Si)
5xx.x	Magnesium (Mg)
6xx.x	Tidak dipakai
7xx.x	Seng (Zn)
8xx.x	Timah (Sn)
9xx.x	Unsur lain

Digit pertama mengidentifikasi grup dari paduan, digit kedua dan ketiga mengidentifikasi paduan aluminium atau kemurnian dari aluminium tersebut, sedangkan digit terakhir yang terpisah dengan titik desimal mengidentifikasi bentuk dari produk, *ingot* atau coran^[10].

2.2 Duralumin

Duralumin (biasa disebut juga duraluminium, duraluminium, atau dural) merupakan nama dagang dari paduan aluminium tuang seri 2xx.x dengan kandungan unsur dominan Cu yang berkisar antara 2.5% - 4.5%, biasanya juga ditambahkan Mn dan Mg sebagai unsur dominan lainnya tetapi tidak melebihi dari kadar 1%^{[2][3][11]}. Duralumin pertama kali dikembangkan oleh seorang *metallurgist* kelahiran Jerman bernama Alfred Wilm^[12]. Pada tahun 1901, saat Alfred Wilm sedang melakukan pekerjaannya di pusat penelitian militer (*Military Research Centre*, Neubabelsberg), Alfred menemukan metode *age hardening* untuk paduan aluminium. Terjadi peningkatan kekerasan yang signifikan pada paduan aluminium dengan kandungan Cu 4% yang sedang diteliti oleh Alfred jika dilakukan *age hardening* pada temperatur ruang. Peningkatan kekerasan ini diketahui oleh Alfred secara tidak sengaja, pada awalnya pengukuran kekerasan

terinterupsi oleh hari libur dan ketika pengukuran kekerasan selanjutnya dilakukan keesokan harinya ternyata kekerasan paduan aluminium tersebut sudah meningkat drastis akibat *age hardening* pada temperatur ruang. Pada tahun 1906 Alfred Wilm mematenkan paduan aluminium (Al-3.5–5.5%Cu-Mg-Mn ; Mg dan Mn >1%), duralinium menjadi nama populer paduan aluminium tersebut pada saat itu dan banyak digunakan di industri pesawat terbang.

2.2.1 Karakteristik Duralumin dan Pengaruh Unsur Paduannya

Unsur-unsur paduan yang ditambahkan memiliki karakteristik yang berbeda satu sama lain. Pemaduan ini dilakukan dengan variasi kadar agar didapatkan sifat yang sesuai dengan kebutuhannya. Duralumin secara umum memiliki karakteristik material yang ringan, *strength-to-weight* ratio yang tinggi, ketahanan korosi yang baik, konduktivitas listrik yang baik, ketangguhan dan ketahanan fatik yang sangat tinggi, dan mampu diberi perlakuan panas.^{[2][4]}

Unsur-unsur dominan yang terdapat pada Duralumin yaitu:

1. Cu dengan kadar sebesar 2,5% - 4,5%
2. Mn dan Mg dengan kadar sebesar <1%

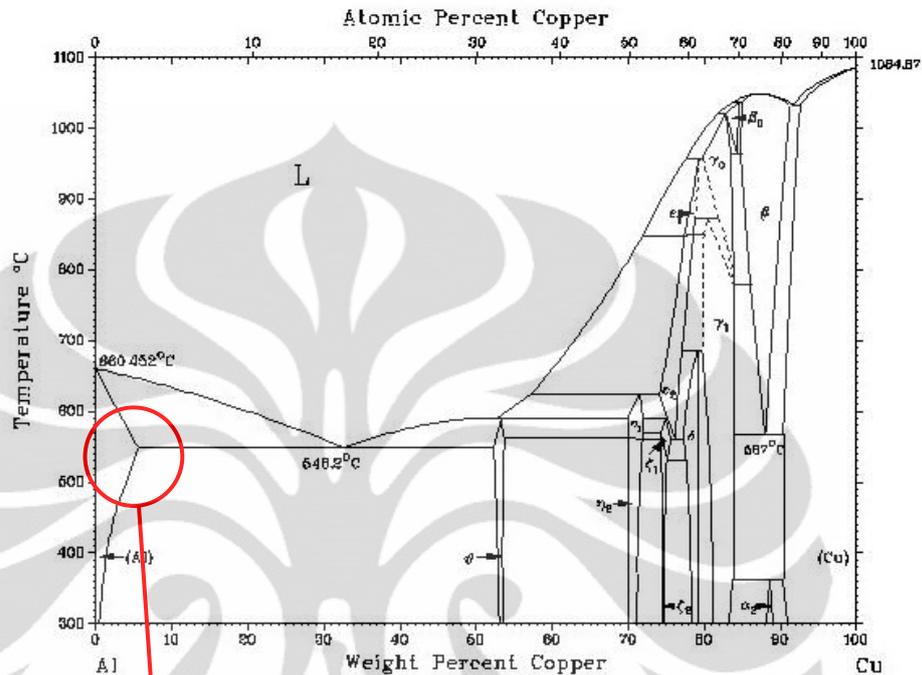
Berikut ini adalah pengaruh unsur-unsur diatas dalam pemaduannya dengan aluminium:

1. Tembaga (Cu)

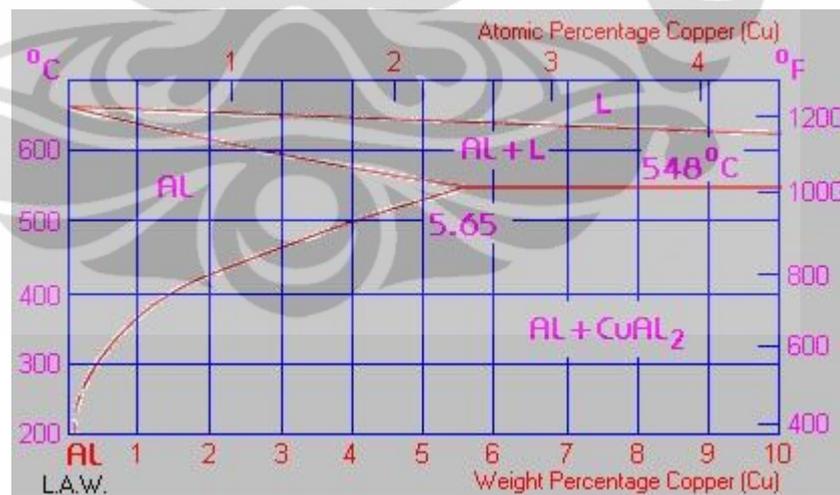
Kelarutan padat maksimum Cu dalam aluminium adalah sebesar 5,65% pada temperatur 550° C (dapat dilihat pada gambar 2.1 dan gambar 2.2 di bawah), jika Cu terus ditambahkan melebihi dari kadar kelarutan padat maksimumnya maka akan terbentuk fasa intermetalik seperti CuAl₂ yang meningkatkan kekerasan tetapi mengurangi keuletan.^[5] Sehingga kadar Cu yang sering dipakai adalah berkisar 2-5%. Pengaruh tembaga pada paduan aluminium adalah sebagai berikut:

- Meningkatkan kekuatan dan kekerasan
- Menurunkan *castability* (mampu cor)
- Menurunkan ketahanan terhadap retak panas (*hot tear*)^{[10][13]}
- Menurunkan ketahanan korosi
- Dapat diberi perlakuan panas
- Mempermudah proses permesinan

Diagram fasa AlCu (dapat dilihat pada gambar 2.1 dan gambar 2.2 di bawah ini) menunjukkan titik lebur paduan Al-Cu ini kurang dari 650°C .



Gambar 2.1 Diagram Fasa Biner Al-Cu^[4]



Gambar 2.2 Diagram Fasa Biner Al-Cu (diperbesar)^[14]

2. Magnesium (Mg)

Penambahan magnesium memberikan ketahanan korosi yang baik. Peningkatan kandungan Mg akan semakin meningkatkan *yield strength*, *hardness*, *stiffness*, dan menurunkan fluiditas. Selain itu penambahan Mg

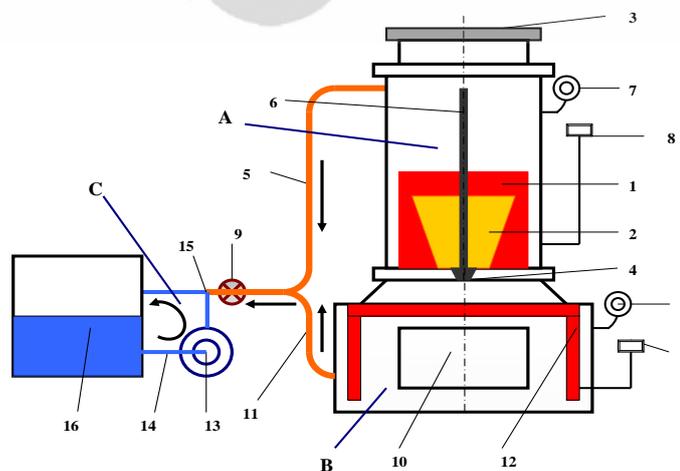
dapat memberikan permukaan akhir produk cor yang cemerlang dan peningkatan sifat mampu las^[15].

3. Mangan (Mn)

Penambahan Mn pada paduan aluminium sangatlah terbatas. Mn dapat meningkatkan ketahanan korosi tetapi Mn juga dapat mengkasarkan butir dan permukaan benda coran^{[10][13]}.

2.3 Tungku Pengecoran Sistem Vakum (PSV)^[2]

Pengecoran sistem vakum (PSV) dirancang untuk mengurangi cacat pengecoran yang disebabkan oleh porositas gas khususnya pada pengecoran paduan aluminium, tungku PSV memberikan hasil coran yang memiliki sifat mekanis lebih baik dibandingkan dengan gravity casting^[12]. Semakin banyak porositas pada produk cor, maka luas permukaan produk akan semakin berkurang akibat pori-pori yang terbentuk sehingga kekuatannya menurun. 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, 10). *stop valve*. B). Ruang solidifikasi terdiri dari cetakan produk (spesimen), 11). lubang masuk-keluar cetakan, 12). saluran pipa vakum, 13). elemen pemanas listrik, C). Komponen vakum terdiri dari 14). pompa air, 15). pipa saluran air, 16). *nozle* dan pipa kapiler, 17). reservoir air. Skema konstruksi dan nomor bagian PSV dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Skema Pengecoran Sistem Vakum^[2]

2.4 Solidifikasi

Pembekuan dan peleburan merupakan sebuah transformasi antara keadaan kristalografi dan keadaan non-kristalografi dari logam ataupun paduan. Transformasi ini merupakan sebuah dasar dalam bidang pengecoran. Untuk mengendalikan/mendapatkan sifat-sifat mekanis dari suatu paduan terlebih dahulu harus mengerti tentang mekanisme pembekuan dan parameter apa saja yang mempengaruhinya seperti distribusi temperatur, laju pendinginan dan pemaduan. Parameter lain yang berpengaruh terhadap proses pembekuan adalah cetakan, gating system, dan sifat-sifat bahan paduan.^[16]

2.4.1 Nukleasi

Jika suatu logam cair dituang ke dalam cetakan maka akan terjadi proses pendinginan menuju temperatur solidusnya. Proses solidifikasi ini diawali dengan terbentuknya suatu titik kecil kristal logam yang disebut dengan nukleus.

Nukleasi adalah munculnya kelompok atom di dalam cairan logam yang kemudian akan menjadi tempat pengendapan atom-atom lain untuk meneruskan pertumbuhannya menjadi kristal padat.^[14]

Nukleasi heterogen lebih mudah terjadi pada tempat-tempat yang kelebihan energi misalnya pada grain boundary (batas butir). Hal ini disebabkan energi bebas pada grain boundary lebih besar jika dibandingkan pada daerah kristalnya. Dalam prakteknya, nukleasi homogen jarang terjadi karena kecil sekali kemungkinan untuk terbentuknya nukleus secara seragam. Nukleasi heterogen terjadi pada dinding cetakan atau pada partikel pengotor yang tidak larut.^[17]

2.4.2 Solidifikasi Logam Paduan

Pertama-tama nukleasi akan terjadi di dekat dinding cetakan sehingga akan muncul suatu lapisan padat di daerah cetakan. Kemudian nukleasi ini akan tumbuh memanjang tegak lurus sampai ke tengah, pertumbuhan memanjang ini strukturnya dinamakan dendrit. Atom-atom asing yang ada pada logam cair akan membantu proses nukleasi dan akan menjadi pusat pertumbuhan pada pembekuan lebih lanjut. Semakin sedikit logam cair yang tersisa maka jarak antara lengan-lengan dendrit akan semakin dekat (pendek) dan pertumbuhannya akan berhenti setelah bertemu dengan lengan dendrit lainnya yang berdekatan. Batas tempat pertemuan ini dinamakan batas butir, batas butir merupakan batas antara kristal

(nukleus) yang memiliki orientasi/arah yang berbeda. Batas butir merupakan daerah yang diisi oleh atom-atom yang tidak mempunyai susunan tertentu dan juga memiliki konsentrasi inklusi yang tinggi karena daerah ini adalah daerah yang terakhir membeku.

Terdapat dua jenis rentang solidifikasi pada suatu proses solidifikasi pada logam/paduan, yaitu^[18]:

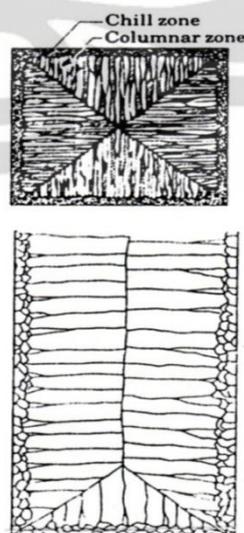
- Rentang Pembekuan Pendek

Solidifikasi dimulai dari bagian tepi dinding menuju ke tengah logam cair. Hal ini menyebabkan bagian tengah akan mengalami pemanasan berulang-ulang hingga bagian yang membeku pada kedua sisi bertemu, saat ini aliran akan berhenti. Paduan dengan rentang pembekuan pendek akan memiliki fluiditas (mampu alir) yang baik.

- Rentang Pembekuan Panjang

Solidifikasi terjadi pada bagian depan. Akibat pembekuan aliran logam, maka terjadi turbulensi pada bagian belakang aliran sehingga lengan-lengan dendrit yang telah membeku mengalami *remelting* dan terbentuk fasa lumpur berupa serpihan dendrit. Paduan dengan rentang pembekuan panjang akan memiliki fluiditas (mampu alir) yang buruk.

Terdapat tiga jenis proses solidifikasi dengan mengacu pada teori rentang pembekuan di atas, yaitu^[18]:



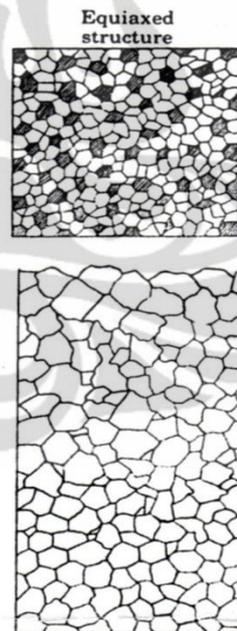
Gambar 2.4 Dendrit Kolumnar^[19]

1. *Columnar dendrites*

Berdasarkan gambar 2.4 di atas, proses yang terjadi pada logam murni ini ditandai dengan pembentukan dendrit, berawal dari dinding cetakan dan terus tumbuh ke arah pusat cetakan hingga akhirnya butir-butir *columnar* yang terbentuk saling bertemu dan bertumbukan hingga terjepit. Proses solidifikasi ini biasanya ditandai dengan terbentuknya pola *shrinkage* pada bagian ujung.

2. *Equiaxed dendrites*

Solidifikasi ini terjadi pada logam yang kaya akan paduan dengan rentang solidifikasi yang panjang. Proses ini terjadi karena laju aliran logam cair terhambat akibat proses nukleasi butir-butir *equiaxed* pada bagian ujung depan aliran logam cair terakumulasinya partikel-partikel kristal padat yang dapat menyebabkan logam cair menjadi semakin kental hingga akhirnya logam cair tersebut membeku dengan membentuk butir-butir yang *equiaxed*. Proses ini ditandai dengan bentuk bagian ujungnya yang membulat.

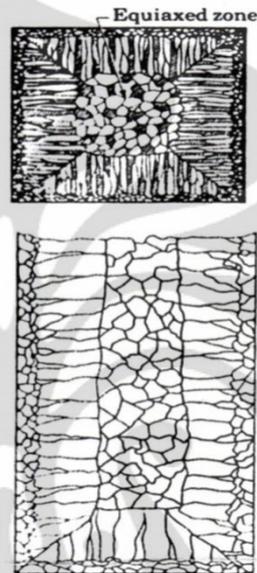


Gambar 2.5 Dendrit *Equiaxed* ^[19]

3. *Mixed Growth*

Merupakan perpaduan antara *columnar* dan *equiaxed dendrites*, selama logam cair mengalir dalam cetakan, butir-butir *columnar* sepanjang dinding cetakan tersebut mulai terbentuk. Pada bagian ujung aliran terjadi

proses nukleasi butir-butir *equiaxed*. Seiring dengan pertumbuhan butir-butir *columnar* menuju arah pusat cetakan, butir-butir tersebut akan saling bertemu dan bertumbukan sehingga terjepit dan aliran logam cair akan berhenti. Pada bagian ujung aliran belum sepenuhnya membeku, tetapi pada akhirnya bagian ujung aliran tersebut akan membeku dengan membentuk butir-butir yang *equiaxed*.



Gambar 2.6 Mixed Growth ^[19]

2.5 Porositas^[6]

Cacat porositas merupakan masalah yang sering dijumpai pada proses pengecoran^[7]. Cacat ini dapat merugikan karena akan mengurangi kekuatan mekanis dari benda hasil coran tersebut, terlebih lagi dapat menyebabkan terjadinya retak pada benda hasil tuang tersebut.

Terdapat dua jenis porositas menurut penyebab terjadinya, yaitu:

1. Porositas karena gas.
2. Porositas karena penyusutan (*shrinkage*)

Porositas karena gas terjadi karena terperangkapnya gas di dalam benda hasil tuang tersebut pada waktu terjadi solidifikasi dari fase cair menjadi fase solid (padat)^[12]. Hal ini terjadi karena perbedaan kelarutan gas yang sangat tinggi pada fasa cair dan fasa solid, sehingga pada saat solidifikasi akan terjadi nukleasi dari gas yang akan keluar dari dalam logam. Sedangkan cacat porositas karena penyusutan terjadi akibat penyusutan volume yang dapat diakibatkan oleh perbedaan ketebalan benda cor yang terlalu besar, terdapatnya bagian tebal yang

tidak dapat dialiri logam cair secara utuh, saluran masuk dan penambah yang kurang banyak atau terlalu kecil, saluran masuk dan penambah yang salah dalam peletakannya.

2.5.1 Porositas Gas^{[18][20]}

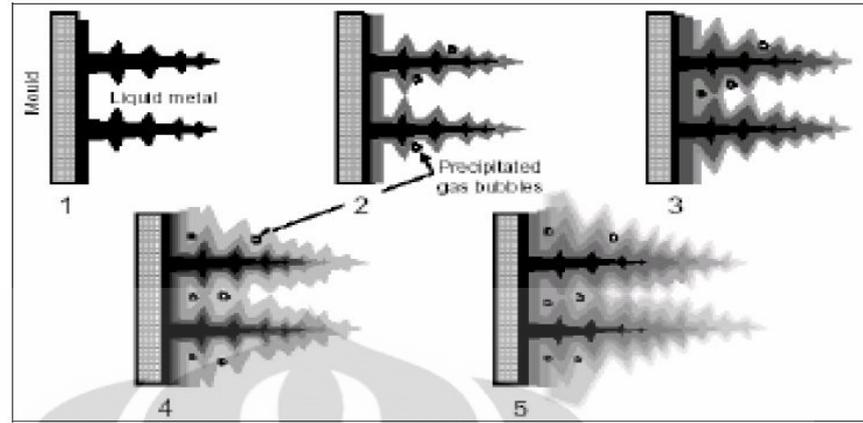
Terdapat tiga sumber gas yang dapat menyebabkan terjadinya cacat porositas pada produk coran, yaitu:

- Udara yang terhisap masuk bersama logam cair pada waktu proses penuangan (pouring).

Desain dari gating system yang tidak benar dapat menyebabkan terhisapnya udara saat proses penuangan. Sehingga perlu dilakukan desain yang sesuai dengan bentuk aliran logam cair agar saat melewati saluran tidak terdapat celah udara yang memungkinkan terhisap saat proses penuangan, dan jika terperangkap pada proses solidifikasi maka akan terjadi cacat porositas.

- Gas/udara yang larut di dalam logam cair pada saat proses peleburan.

Seiring dengan meningkatnya temperatur dari logam cair maka kelarutan gas di dalam logam cair akan meningkat. Sebaliknya, kelarutan dari gas akan berkurang dengan cepat ketika terjadi penurunan temperatur dari logam cair. Ketika kelarutan dari gas ini menurun maka akan terjadi nukleasi dari gas yang larut di dalam logam cair yang nantinya akan naik ke permukaan. Inti dari gas ini berbentuk gelembung menyerupai bola (bulat), hal ini dikarenakan bentuk tersebut mempunyai luas permukaan yang lebih kecil dibandingkan bentuk lain, sehingga energi yang diperlukan untuk membentuk gelembung tersebut akan lebih kecil jika dibandingkan energi yang dibutuhkan untuk membentuk bentuk lain. Suatu gelembung dikatakan telah menjadi porositas jika terhalang naik ke permukaan logam cair dan terperangkap.



Gambar 2.3 Ilustrasi proses terperangkapnya gelembung sehingga menyebabkan porositas gas^[18]

- Gas atau uap yang timbul akibat terjadinya kontak antara logam cair dengan dinding cetakan.

Terjadi akibat cetakan yang mengandung bahan yang mudah menguap seperti air (cetakannya basah), ketika logam cair dituang ke cetakan dan gas atau uap ini masuk ke dalam logam yang masih cair. Gas juga dapat terjadi akibat reaksi kimia antara logam cair dengan dinding cetakan yang sudah di lapis (*coating*).

Porositas karena gas yang mempunyai bentuk bulat sering disebut sebagai “*blowholes*” sedangkan porositas karena gas yang mempunyai bentuk memanjang disebut sebagai “*wormholes*”, bentuk *wormholes* yang memanjang disebabkan gelembung tersebut terhambat oleh lapisan fase cair-padat yang sedang bergerak membentuk padatan. Fasa cair-padat tersebut akan terdesak oleh tekanan dari gelembung sehingga bentuk gelembung nya akan memanjang. Porositas karena gas mempunyai permukaan pori bagian dalam yang halus.

2.5.2 Porositas Penyusutan^{[18][21]}

Porositas yang disebabkan oleh penyusutan memiliki bentuk yang tidak beraturan, dan permukaan bagian dalam dari cacat tersebut agak kasar. Hal ini dikarenakan cacat porositas jenis ini terjadi akibat logam cair terjebak di antara struktur dendrit. Biasanya cacat porositas terjadi pada bagian tengah produk coran terutama bagian yang dekat dengan *riser* atau pada bagian sambungan. Karena bagian tersebut merupakan bagian yang terakhir membeku (*hot spot*).

Terdapat dua jenis porositas penyusutan, yaitu:

- Penyusutan Luar

Cacat jenis ini memberikan lubang/pori pada permukaan luar produk coran. Hal ini dikarenakan gagalnya logam cair membeku secara serentak pada daerah tuangan yang memiliki ketebalan berbeda. Sehingga perlu dilakukan kontrol temperatur peleburan, sebaiknya dilakukan penambahan temperatur di atas temperatur lebur (*superheat*). Diharapkan dengan diberikannya panas tambahan maka dapat meningkatkan mampu alir dari logam cair yang dilebur sehingga mampu mengisi seluruh bagian dari cetakan. Selain itu *riser* harus berfungsi dengan baik untuk mengkompensasi penyusutan.

- Penyusutan Dalam

Cacat jenis ini terjadi akibat terjebakanya logam cair diantara kristal dendrit sehingga ketika logam cair ini membeku maka akan terjadi penyusutan. Penyebaran/distribusi dari porositas produk coran dapat berbeda-beda tergantung dari perubahan temperatur dalam jarak atau biasa disebut dengan temperatur gradien yang berbeda-beda (K/m). Temperatur gradien yang besar akan menyebabkan cacat porositas yang terpusat, sedangkan temperatur gradien yang kecil menyebabkan porositas yang menyebar

2.6 Software Z-Cast V2.6.7

Z-Cast merupakan *software* simulasi proses pengecoran yang dibuat oleh KITEch, Korea. Software yang berbasis FDM (*Finite Difference Method*) ini dapat memprediksi serta mengamati aliran logam cair, proses solidifikasi, cacat porositas penyusutan, persebaran panas, serta dapat menentukan lokasi dari bagian yang membeku terakhir.

Untuk menjalankan simulasi, terlebih dahulu harus dibuat *casting design* produk yang ingin disimulasikan menggunakan *software* desain 3D seperti AutoCAD atau SolidWork dan mengubah format dari desain tersebut menjadi format STL (*stereolitography*) agar bisa dijalankan di *software* Z-Cast.

Z-Cast memiliki beberapa fitur/*module* analisis yaitu: analisis aliran (*Flow*) dan analisis solidifikasi (*Solidification*). Analisis *flow*

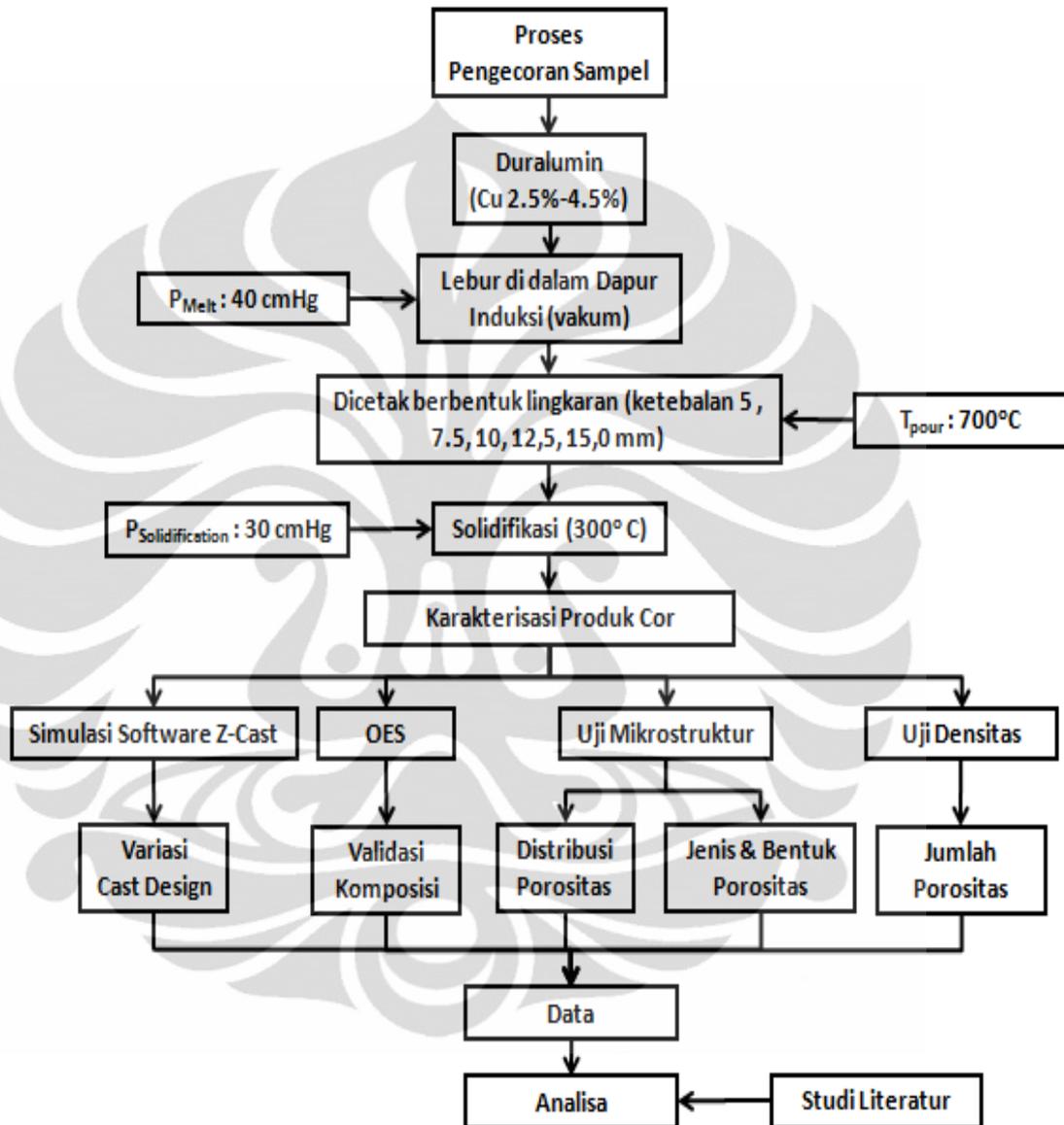
berfungsi untuk melihat aliran logam saat pengisian, kecepatan pengisian, tekanan, dan fraksi solid. Analisis solidifikasi dapat digunakan untuk melihat distribusi temperatur saat proses pembekuan logam cair, lamanya waktu pengisian, bilangan Niyama, temperatur gradient, dan porositas penyusutan.

Kelebihan dari *software* yang berbasis FDM ini adalah kemudahan dalam pengaplikasiannya. Sebagai contoh, pada awal proses simulasi *Mesh*-ing dapat dilakukan dengan memasukkan angka yang telah *digenerate* oleh *software* ini. *Mesh* merupakan diskritisasi/pembagian unit/elemen terkecil dari suatu permasalahan (*problem*).^[31] Semakin besar dan rumit geometri dari produk cor, maka *Mesh Element* nya akan semakin besar. Kelebihan lainnya dari *software* ini adalah lengkapnya fitur analisis untuk memprediksi cacat porositas terutama porositas penyusutan.

Selain kelebihan, Z-Cast juga memiliki beberapa kekurangan yaitu pada faktor material, Z-Cast memiliki keterbatasan dalam memilih spesifikasi material produk yang sesuai. Tidak semua material tersimpan dalam database Z-Cast. Sehingga dalam penggunaannya untuk simulasi yang menggunakan material yang jarang digunakan maka akan sulit untuk menemukan material yang cocok untuk simulasi. Selanjutnya, terbatasnya parameter proses pengecoran seperti tidak adanya *feature* proses pengecoran sistem vakum, hal ini disebabkan kurang lumrahnya proses pengecoran sistem vakum tersebut digunakan dalam industri pada saat ini.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir penelitian



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Dapur Induksi
2. Cetakan logam berbentuk elips dengan 5 variasi ketebalan
3. Alat vakum
4. *Software Z-Cast*

5. *Digital Camera* .
6. Gergaji logam.
7. OES (*Optical Emission Spectroscopy*)
8. Cetakan mounting
9. Mesin amplas.
10. Mesin poles.
11. Mikroskop optik.
12. Jangka sorong.
13. Mikroskop ukur.
14. Lain-lain : kantong plastik, label, spidol, tang penjepit, palu, penggaris, sarung tangan.

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

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

3.3 Prosedur Penelitian

3.3.1 Pengecoran Spesimen Menggunakan Tungku PSV^[2]

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



Gambar 3.2 Dapur Induksi (pengecoran sistem vakum)



Gambar 3.3 Cetakan Permanen (baja karbon rendah)

Proses pengecoran ini dilakukan sebanyak 5 kali dengan variasi penambahan unsur tembaga pada masing-masing paduan aluminium yang digunakan, kemudian didinginkan tanpa adanya perlakuan panas (alami).

3.3.2 Persiapan Sampel

- Pemotongan Sampel

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

- *Mounting*

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

- *Pengamplasan Sampel*

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

- *Pemolesan Sampel*

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

- *Etching*^[22]

Etsa dilakukan untuk mempermudah proses pengamatan mikrostruktur di bawah mikroskop. Etsa yang digunakan adalah Keller's Reagent (2 mL HF 48%, 3 mL HCl, 5 mL HNO₃, 190 mL H₂O). Prosedur berikut ini sesuai dengan ASTM *Handbook Vol.9 Metallography and Microstructure*:

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

3.3.3 Pengujian Mikroskop Optik

Setelah pengamplasan selesai dengan *grid* terbesar, maka sampel akan dilihat dibawah mikroskop optic (gambar 3.4 di bawah) dengan perbesaran 50x-200x untuk melihat distribusi porositas gas dan penyusutan dan menghitung diameter rata-rata dari semua pori yang ada.

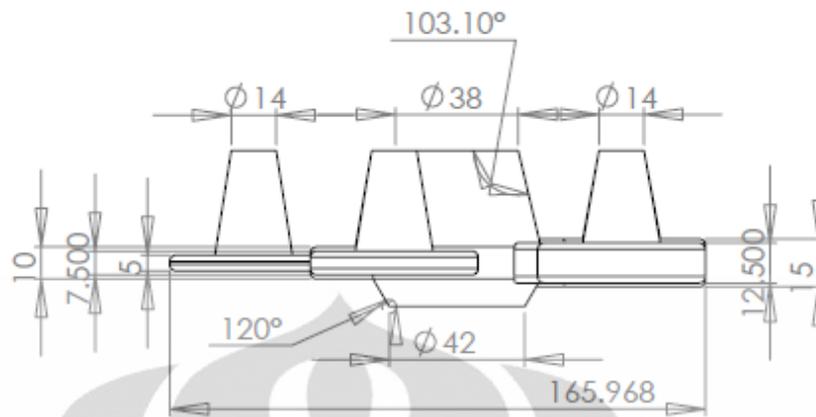


Gambar 3.4 Mikroskop Optik

3.3.4 Pengujian Densitas^[2]

Nilai porositas spesimen akan di dapatkan dengan menggunakan prosedur sebagai berikut:

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



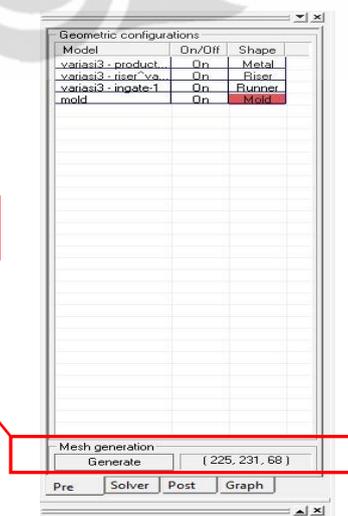
Gambar 3.7 Desain Produk 3D (Solidworks 2010). *Tampak Samping.*

Kepresisian dari dimensi desain sangat diharapkan guna ketepatan hasil simulasi. Format *.STL* (*stereolithography*) merupakan syarat agar simulasi menggunakan *software* Z-Cast dapat berlangsung, sehingga desain yang telah dibuat menggunakan *software* Solidworks 2010 tadi terlebih dahulu disimpan menjadi format *.STL*.

Selanjutnya dilakukan pengaturan simulasi. Pengaturan generik simulasi menggunakan *software* Z-Cast beberapa diantaranya meliputi^[23] :

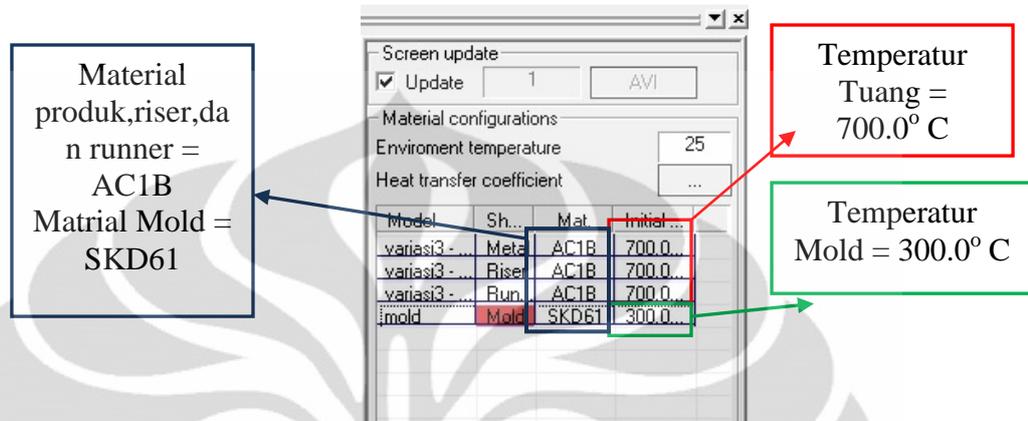
1. Pengaturan *mesh*, *mesh* merupakan tingkat kedetailan visual. Semakin detail visual yang didapat maka semakin presisi (mendekati keaktualan) hasil simulasi tersebut, tetapi proses *running* akan semakin lama.

Mesh Generator : pengaturan



Gambar 3.8 *Mesh Generator*

2. Selanjutnya dilakukan pengaturan *properties* dari material produk dan material cetakan. Pemilihan material ini diusahakan memilih material yang memiliki karakteristik paling mirip dengan keadaan aktual.
3. Pengaturan temperatur tuang dan temperatur cetakan.



Gambar 3.9 Pengaturan T_{pour} dan T_{mold}

4. Pengaturan analisis solidifikasi dan analisis aliran.

Setelah didapat *output* dari hasil simulasi menggunakan *software* Z-Cast, selanjutnya akan dilakukan komparasi dengan hasil eksperimen. Beberapa aspek yang akan ditinjau adalah kadar porositas, jenis porositas, dan bentuk porositas. Analisis komparasi ini akan dilakukan dengan mengacu pada literatur yang ada.

BAB IV PEMBAHASAN

4.1 Analisa Produk Hasil Coran

Terdapat sebanyak lima produk cor duralumin yang dihasilkan dari pengecoran induksi vakum dengan tekanan peleburan sebesar 40 cmHg dengan kadar Cu (2.5%, 3%, 3.5%, 4%, dan 4.5%). Dari masing-masing kadar tersebut terdapat 5 variasi ketebalan dari produk (5 mm, 7.5 mm, 10 mm, 12.5 mm, dan 15 mm). Produk cor yang dihasilkan dari lima kali proses pengecoran tersebut kemudian diuji OES untuk validasi kandungan unsur-unsurnya. Data tersebut dapat dilihat pada tabel 4.1 di bawah ini:

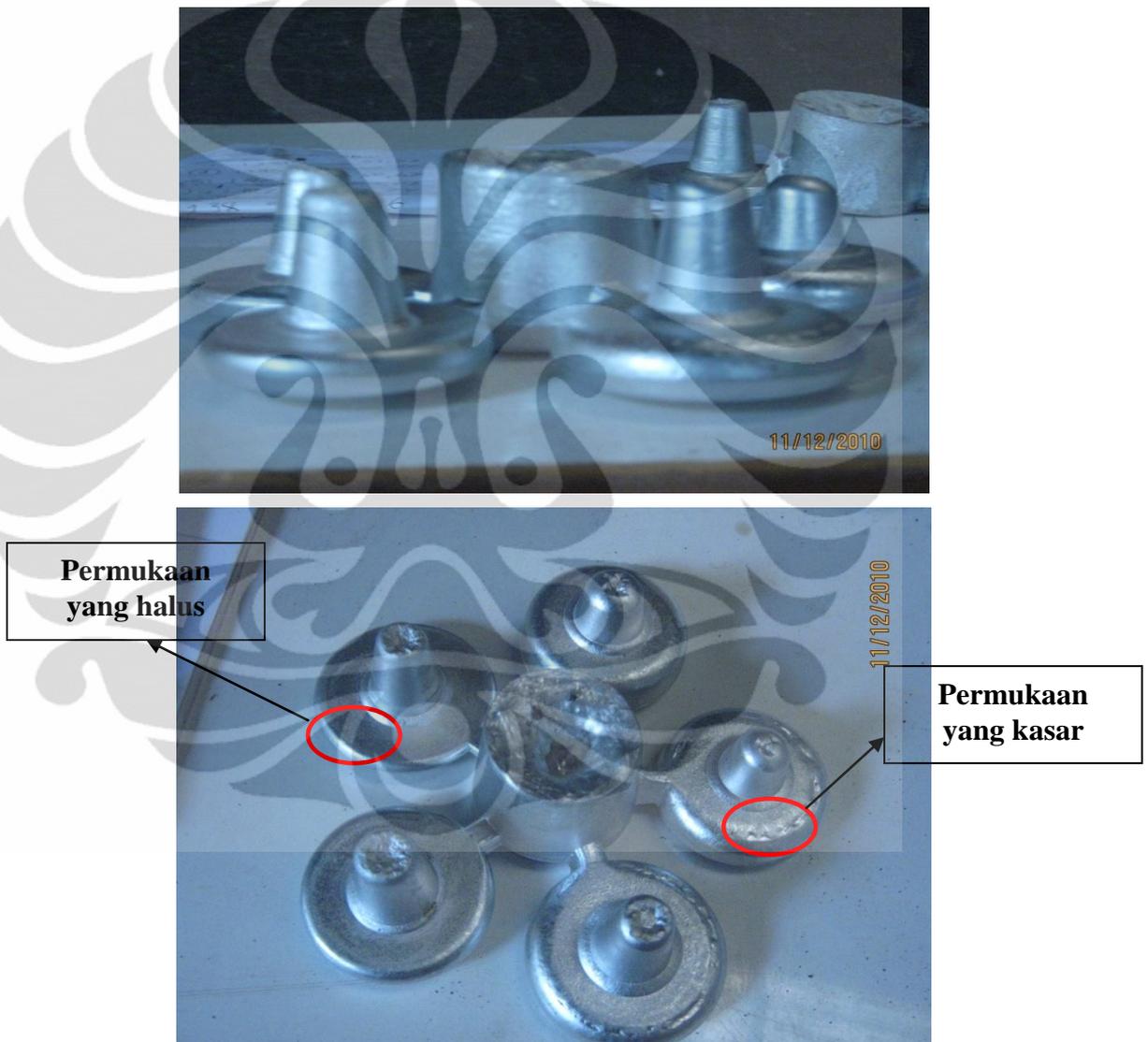
Tabel 4.1 Unsur-unsur dalam logam duralumin yang digunakan

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

Dari tabel 4.1 di atas dapat dilihat kandungan unsur minor pada duralumin hasil coran, kandungan unsur-unsur minor tersebut berbeda satu sama lain. Keberadaan unsur-unsur minor ini dapat disebabkan oleh pengotor yang berasal dari *scrap*, alat-alat pengecoran ataupun lingkungan tempat material disimpan sebelum dilebur.^[10] Meskipun dalam jumlah yang relatif sedikit, unsur-unsur minor ini mempunyai pengaruh pada sifat fisik (berat jenis) dan metalografi (porositas, fasa, dan mikrostruktur).^[2]

Dari gambar 4.1 di bawah dapat dilihat permukaan produk cor dengan ketebalan 5 mm, 7.5 mm, 10 mm terbilang cukup halus dan minim cacat permukaan seperti *outer shrinkage* (penyusutan luar) dan *misrun*, hal sebaliknya terjadi pada produk cor tebal yang memiliki permukaan tidak rata, hal ini disebabkan *pre-heating* cetakan (*mold*) hingga 300° C sehingga permukaan produk cor yang tebal membutuhkan waktu solidifikasi yang lebih lama ketimbang produk cor yang tipis, hal ini yang menyebabkan produk cor yang tebal

lebih rentan mengalami porositas penyusutan di bagian luar. *Ingate* atau saluran masuk yang kecil dan tipis bertujuan untuk mengontrol debit logam cair yang mengalir menuju produk cor agar tidak terlalu cepat dan tidak menimbulkan turbulensi yang dapat memicu terjadinya porositas, hal ini sebenarnya dapat memicu cacat *misrun*, akan tetapi dengan dilakukannya kontrol temperatur peleburan (penambahan temperatur diatas temperatur lebur / *superheat*) sehingga logam cair mampu mengalir dan mengisi seluruh bagian cetakan^[19].



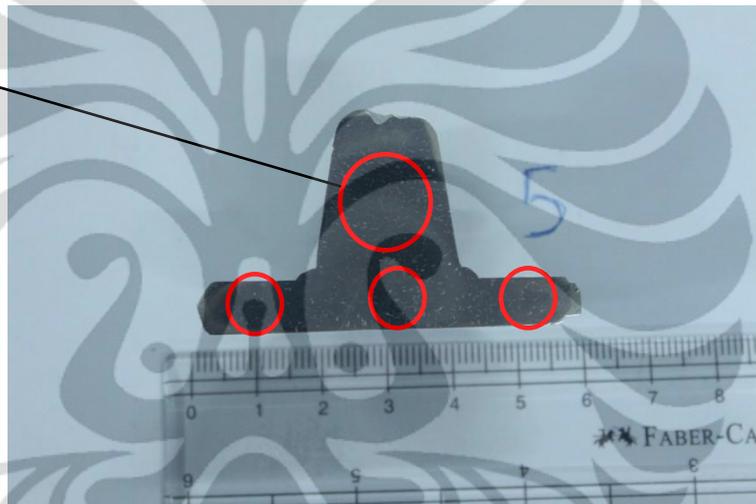
Gambar 4.1 Produk Cor (utuh) tampak atas dan samping

Gambar 4.2, 4.3, 4.4, dan 4.5 di bawah merupakan sampel yang di potong secara horizontal menjadi dua bagian, hal ini dilakukan untuk mengamati persebaran (distribusi) dari porositas yang terjadi di bagian dalam produk cor secara makro.



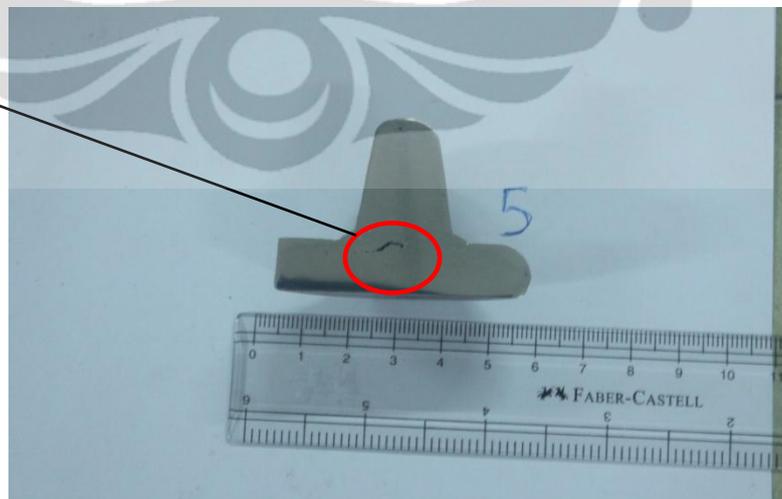
Gambar 4.2 Produk Cor (setelah dipotong secara vertikal)

Porositas gas dan penyusutan

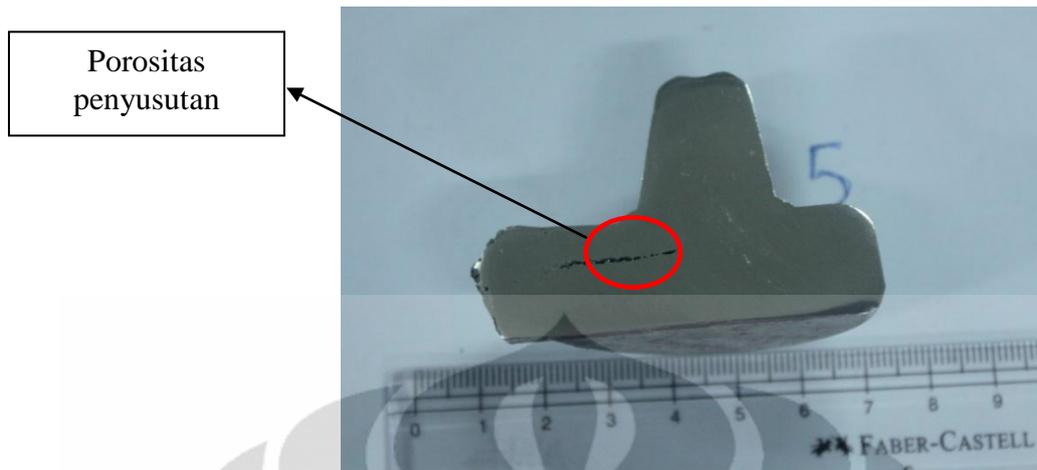


Gambar 4.3 Produk Cor Al4.5Cu (ketebalan 5 mm)

Porositas penyusutan



Gambar 4.4 Produk Cor Al4.5Cu (ketebalan 10 mm)



Gambar 4.5 Produk Cor Al4.5Cu (ketebalan 15 mm)

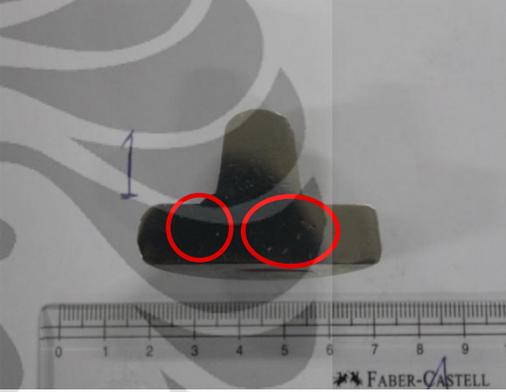
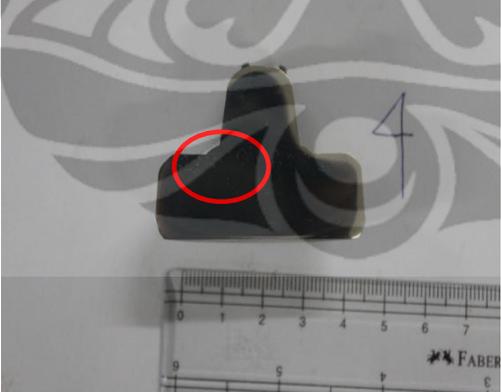
Pada sampel Al4.5Cu dengan ketebalan 5 mm, dapat dilihat pada gambar 4.4 di atas, distribusi porositas gas dan penyusutan yang berukuran kecil tetapi hampir merata diseluruh permukaan bagian yang telah dipoles. Seiring dengan kenaikan ketebalan produk, porositas gas semakin semakin sedikit, akan tetapi porositas penyusutan justru semakin mudah diamati karena *shrink* yang terkonsentrasi di pada dasar *riser* dan bagian tengah produk cenderung besar. Porositas penyusutan sering terjadi pada bagian sambungan atau dekat dengan *riser* karena daerah tersebutlah yang terakhir membeku (*hot spot*), semakin tebal produk cor maka akan semakin rentan pula terjadi porositas penyusutan.^[6]

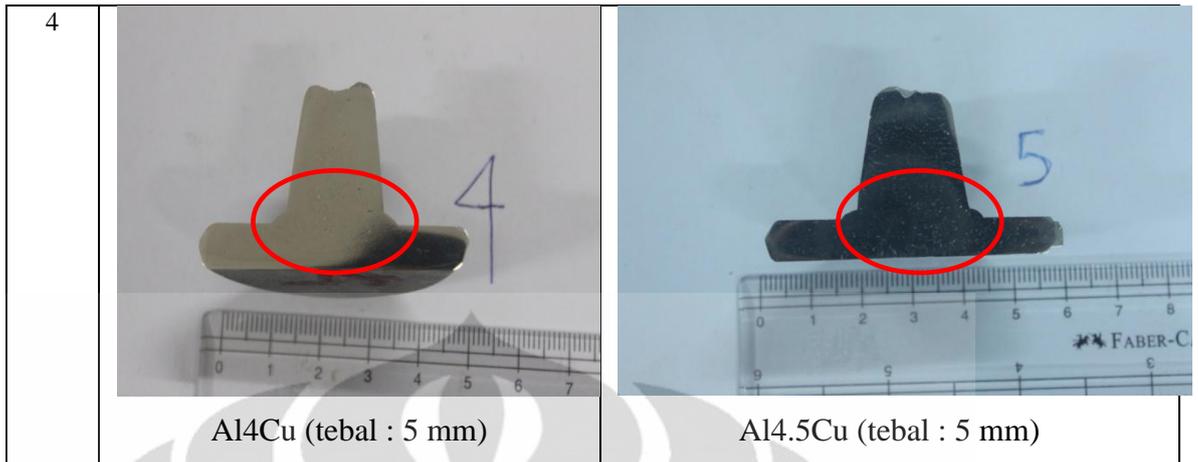
4.2 Analisa Porositas

4.2.1 Analisa Distribusi Porositas

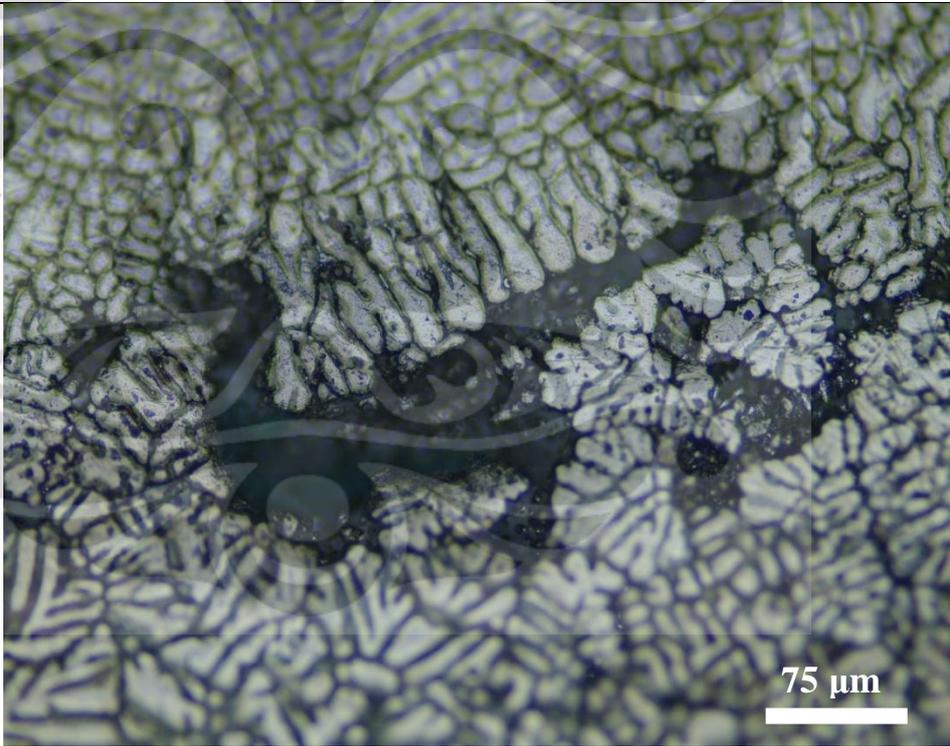
Seperti yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya, pada beberapa sampel, distribusi porositas yang terjadi dapat diamati dengan mata telanjang (secara makro), sebagai contoh: porositas penyusutan yang cenderung terjadi di produk cor dengan ketebalan 10 mm, 12.5 mm, dan 15 mm dapat dengan mudah dilihat tanpa bantuan mikroskop dikarenakan bentuknya yang sembarang dan besar memanjang, sedangkan porositas gas yang berbentuk relatif bulat (berdiamater kecil) dan persebarannya merata di seluruh bagian produk cor, terutama di produk cor yang mempunyai ketebalan 5 mm – 10 mm. Beberapa gambar distribusi porositas tersebut dapat dilihat pada tabel 4.2 di bawah:

Tabel 4.2 Distribusi Porositas (makro)

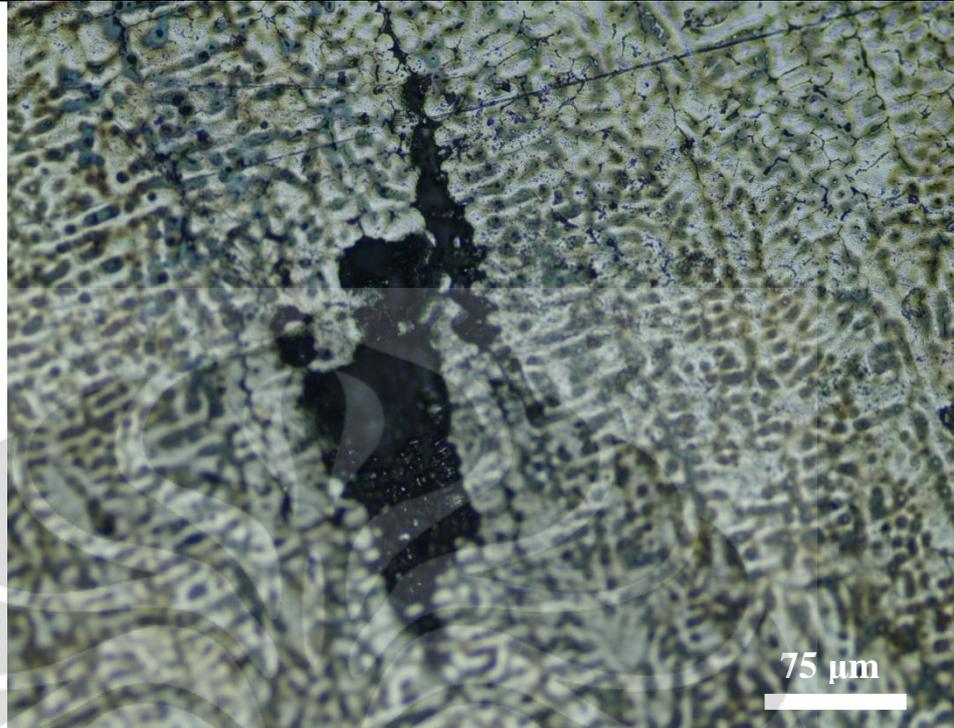
No.	Distribusi Porositas (menggunakan kamera)	
1	 <p data-bbox="483 703 804 741">Al4.5Cu (tebal : 15 mm)</p>	 <p data-bbox="1023 703 1343 741">Al4.5Cu (tebal : 10 mm)</p>
2	 <p data-bbox="483 1173 804 1211">Al2.5Cu (tebal : 15 mm)</p>	 <p data-bbox="1023 1173 1343 1211">Al2.5Cu (tebal : 10 mm)</p>
3	 <p data-bbox="496 1644 791 1682">Al4Cu (tebal : 15 mm)</p>	 <p data-bbox="1035 1644 1331 1682">Al4Cu (tebal : 10 mm)</p>



Tabel 4.3 Distribusi Porositas (mikro)

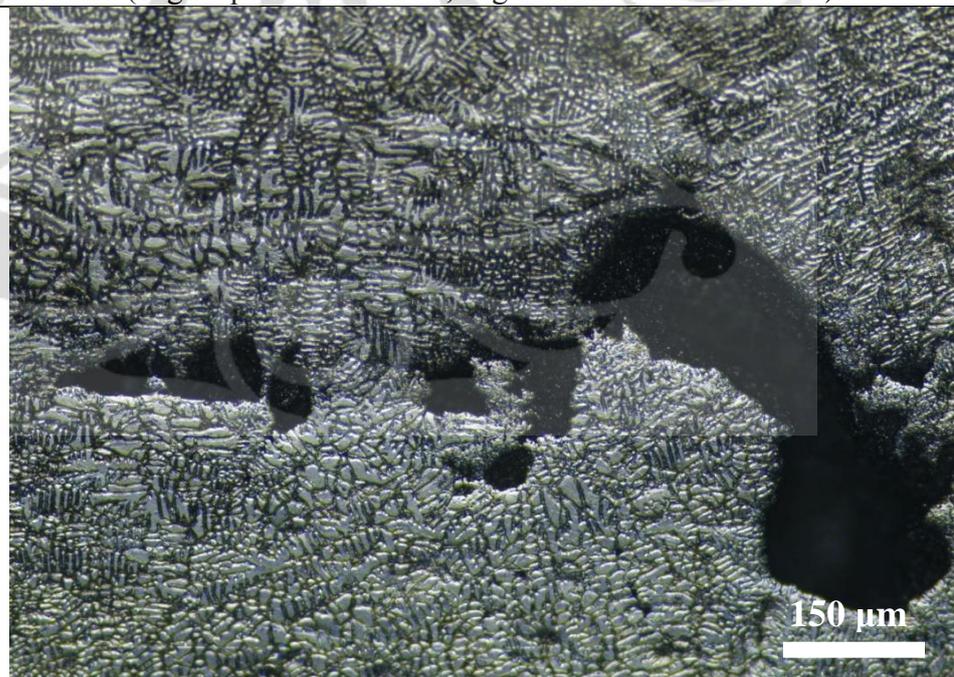
No.	Distribusi Porositas (Menggunakan Mikroskop Optik)
1	 <p data-bbox="762 1644 1082 1677">Al4.5Cu (tebal : 15 mm)</p> <p data-bbox="695 1682 1150 1715">M: 100x, ETSA : Keller's Reagent</p> <p data-bbox="564 1720 1278 1753">(bagian putih : α dendrit , bagian hitam : Fasa eutektik)</p>

2

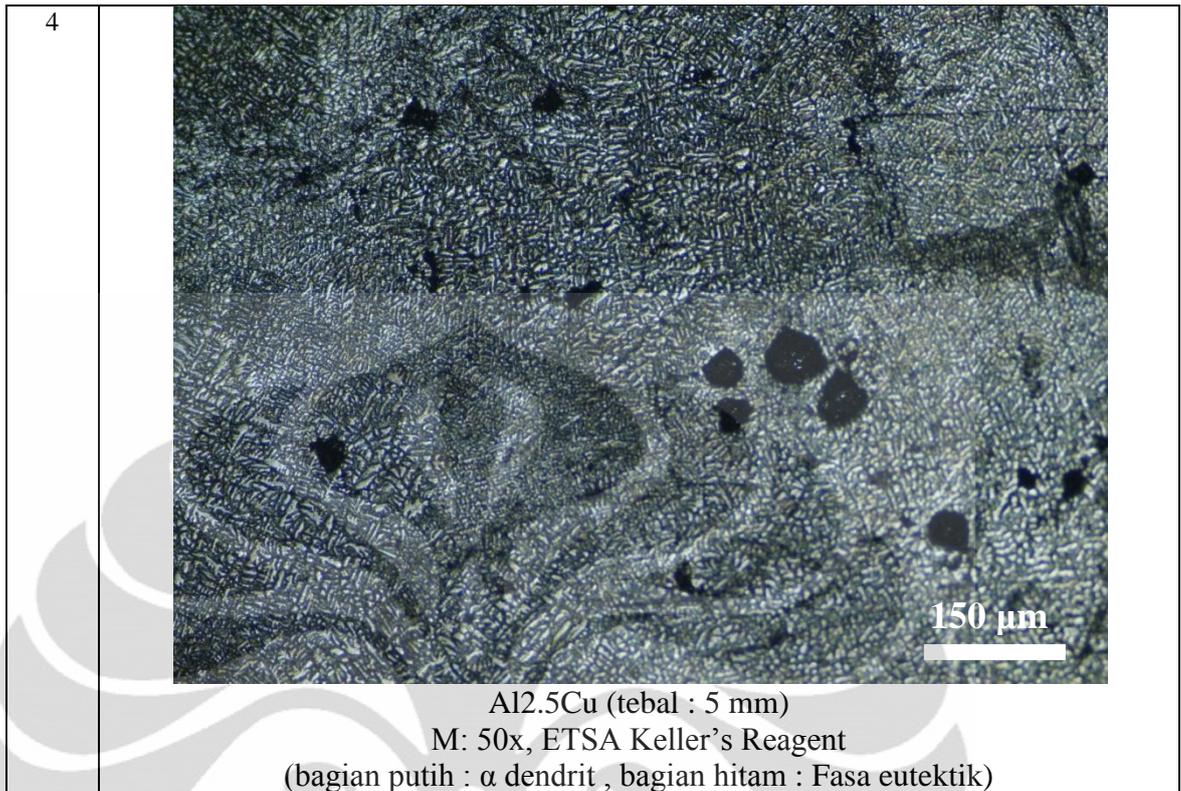


Al_{2.5}Cu (tebal : 12.5 mm)
 M: 100x, ETSA Keller's Reagent
 (bagian putih : α dendrit , bagian hitam : Fasa eutektik)

3



Al_{4.5}Cu (tebal : 10 mm)
 M: 50x, ETSA: Keller's Reagent
 (bagian putih : α dendrit , bagian hitam : Fasa eutektik)



Berdasarkan tabel 4.2 di atas, distribusi porositas gas (gambar nomor 4) tersebar merata hampir di seluruh bagian produk cor, struktur mikronya dapat dilihat pada tabel 4.3 di atas (gambar nomor 4). Porositas gas yang terjadi merupakan cacat yang timbul akibat perbedaan tingkat kelarutan gas hidrogen antara fasa solid dan fasa liquid logam. Sedangkan untuk porositas penyusutan, distribusinya terkonsentrasi/terpusat di bagian tengah produk atau berdekatan dengan dasar *riser* yang merupakan daerah *hot-spot*, dapat dilihat pada tabel 4.2 (gambar nomor 1 dan 2) dan tabel 4.3 (gambar nomor 1, 2, dan 3).

4.2.2 Analisa Jenis dan Bentuk Porositas

Untuk membedakan antara porositas penyusutan dengan porositas gas terbilang cukup sulit^[6]. Hal ini disebabkan cacat-cacat ini seringkali terjadi pada lokasi yang sama, atau biasa disebut dengan porositas gas & penyusutan yang merupakan gabungan antara kedua jenis porositas tadi.

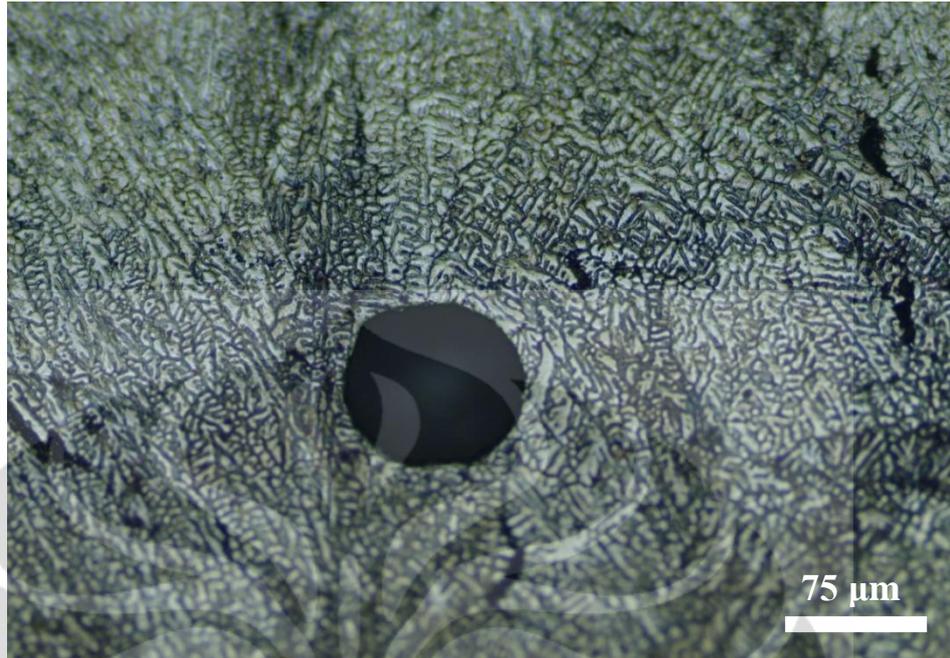
Menurut Pakpahan P, et al. ^[6] dalam penelitiannya mengenai identifikasi cacat gas dan cacat penyusutan pada benda tuang kuningan, porositas gas yang terjadi akibat terperangkapnya gas di dalam benda hasil tuang, dimana gas-gas

tersebut ber-nukleasi dalam bentuk gelembung, maka cacat yang dihasilkannya pun akan berbentuk gelembung, dan karena gelembung tersebut bertekanan, maka permukaan bagian dalam dari cacat porositas yang dihasilkannya juga akan halus dan seragam. Akan tetapi, cacat porositas gas tidak selalu berbentuk bulat, tetapi terkadang berbentuk agak lonjong. Sedangkan cacat porositas penyusutan dapat dibedakan dari bentuknya yang tidak beraturan dan permukaan bagian dalam dari cacat tersebut agak kasar dan tidak seragam, biasanya porositas gas terdapat pada bagian tengah dari produk cor atau bagian yang tebal dikarenakan bagian tersebut merupakan bagian yang terakhir membeku.

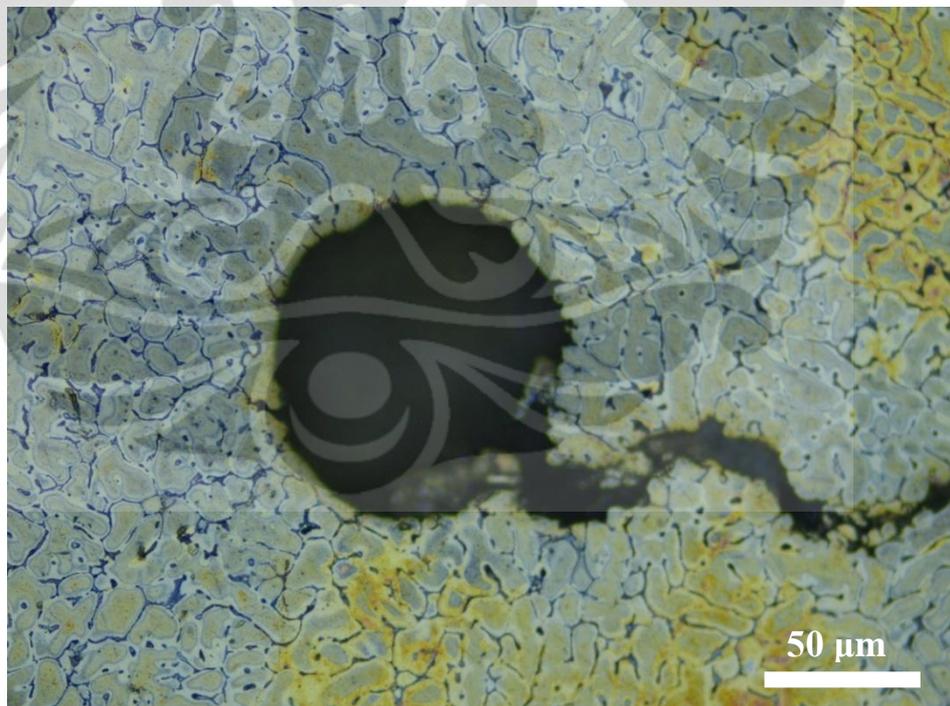
Berdasarkan keterangan di atas, maka gambar 4.6 di bawah ini tergolong porositas penyusutan dikarenakan bentuknya yang tidak beraturan dan merupakan gambar yang peneliti ambil dari produk cor Al4.5Cu (tebal: 15 mm). Sedangkan pada gambar 4.7 di bawah menunjukkan porositas gas yang berdiameter cukup besar yang terjadi pada produk cor Al4Cu (tebal: 10 mm). Selanjutnya, pada gambar 4.8 dapat diidentifikasi bahwa cacat porositas yang terjadi pada produk cor Al4.5Cu (tebal: 15 mm) adalah gabungan dari porositas gas dan porositas penyusutan.



Gambar 4.6 Porositas Penyusutan Pada Produk Cor Al4.5Cu (tebal : 15 mm)
 M:200x, Etsa: KMnO4+HF+NaOH (color etching)
 (bagian kuning : α dendrit , bagian hitam : Fasa eutektik)



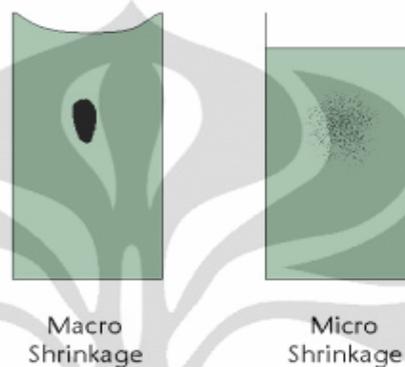
Gambar 4.7 Porositas Gas Pada Produk Cor Al4Cu (tebal : 10 mm)
M:100x, Etsa: Keller's Reagent
(bagian putih : α dendrit , bagian hitam : Fasa eutektik)



Gambar 4.8 Porositas Gas & Penyusutan Pada Produk Cor Al4.5 Cu (tebal : 15 mm)
M:200x, Etsa: $\text{KMnO}_4 + \text{HF} + \text{NaOH}$ (color etching)
(bagian kuning dan biru : α dendrit , bagian hitam : Fasa eutektik)

Terdapat dua jenis porositas penyusutan jika ditinjau dari segi ukuran (gambar 4.9), yaitu porositas penyusutan makro dan porositas penyusutan mikro. porositas penyusutan makro mempunyai ukuran pori penyusutan lebih besar dari 3

mm.^[24] Berdasarkan literatur di atas, maka porositas penyusutan dari gambar 4.6, 4.7, 4.8 merupakan porositas penyusutan makro. Sebutan untuk Porositas penyusutan makro yang terjadi pada duralumin yang merupakan paduan yang mempunyai rentang pembekuan panjang (*long freezing range*) adalah *sponge / centreline shrinking*.^[25]



Gambar 4.9 Ilustrasi sederhana untuk membedakan porositas penyusutan makro dan mikro^[24]

4.3 Analisa Kuantitas Porositas

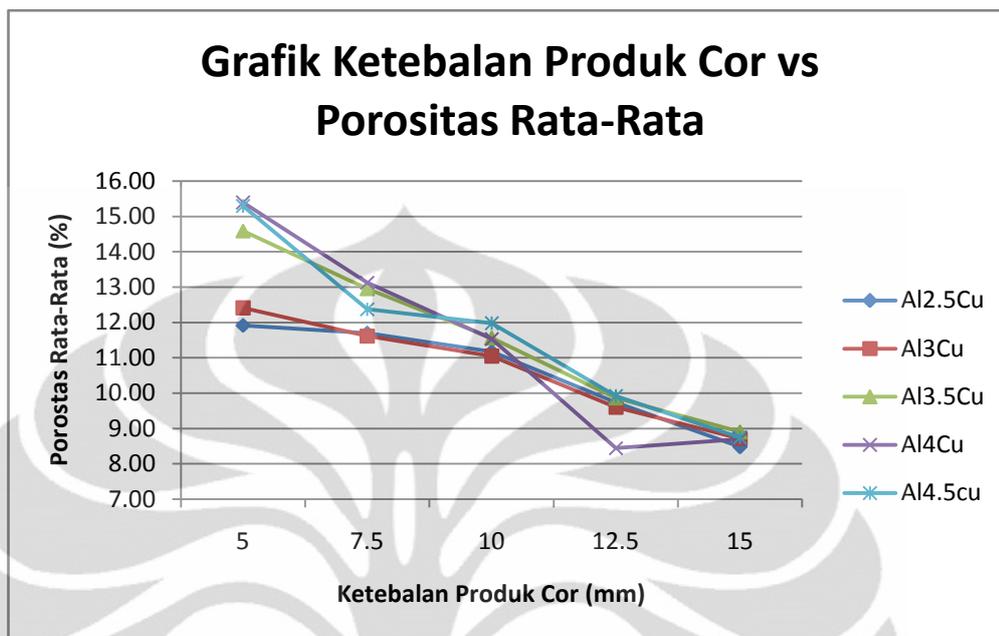
Untuk melakukan uji densitas, maka produk cor dipisahkan dari *gating system* nya dan dipreparasi secara metalografi (amplas dan poles), dapat dilihat pada gambar 4.10 di bawah ini:



Gambar 4.10 Produk Cor dengan dengan ketebalan 15 mm (sampel uji densitas)

Data hasil pengujian densitas yang telah diolah dan ditampilkan dalam bentuk grafik yang memperlihatkan hubungan antara ketebalan produk cor (mm)

dengan porositas rata-rata (%) pada produk cor dengan %wt Cu yang berbeda dapat dilihat pada gambar 4.11 di bawah:



Gambar 4.11 Grafik Ketebalan Produk Cor VS Porositas Rata-Rata

Dari gambar 4.10 di atas dapat dilihat bahwa, persentase maksimum dari porositas rata-rata adalah sekitar 15.5%, sedangkan minimumnya adalah sekitar 8.5%. Hal ini tidak sesuai dengan literatur yang peneliti dapat, seharusnya rentang persentase porositas pada paduan aluminium pada umumnya adalah sekitar 3.5% - 8.5%.^{[26][27]} Hal ini dapat disebabkan karena perhitungan porositas yang dilakukan berdasarkan pada perhitungan densitas teoritis yang menggunakan berat jenis logam duralumin yang didapat dari literatur, bukan berat jenis duralumin aktual dari produk cor. Berat jenis duralumin literatur dan berat jenis duralumin aktual akan berbeda karena pada berat jenis aktual logam akan dipengaruhi oleh unsur-unsur pengotor/inklusi.^[28]

Untuk analisa pengaruh ketebalan terhadap persentase porositas rata-rata, semakin tipis produk cor maka semakin tinggi kadar porositasnya (tertinggi : 15.5%). Seiring dengan meningkatnya ketebalan dari produk cor, maka porositas rata-rata akan semakin sedikit (terendah : 8.5%). Hal tersebut disebabkan oleh sistem vakum dalam proses pengecoran yang dilakukan, gas cenderung berdifusi dari daerah yang berkonsentrasi tinggi (larut dalam logam cair) menuju ke daerah yang berkonsentrasi rendah (lingkungan vakum / di luar logam cair) semakin tipis produk cor maka waktu yang solidifikasi yang dibutuhkan akan semakin sedikit

sehingga gas hidrogen yang terlarut dalam duralumin cair tidak sempat untuk berdifusi ke luar. Sedangkan pada produk cor yang tebal, waktu solidifikasi yang dibutuhkan lebih lama sehingga gas hidrogen yang terlarut dalam duralumin cair akan sempat untuk berdifusi ke luar, sehingga persentase porositas gas cenderung akan menurun seiring peningkatan ketebalan produk^[29].

Masih dalam grafik yang sama, semakin meningkatnya persentase Cu pada duralumin maka cenderung akan meningkatkan persentase porositas rata-rata, pada grafik dapat dilihat Al2.5Cu (indikator warna biru tua) dengan ketebalan produk cor 5 mm memiliki 12.5% porositas rata-rata, sedangkan untuk produk Al4.5Cu (indikator warna biru tua) dengan ketebalan produk cor yang sama memiliki kadar porositas rata-rata yang lebih tinggi, yaitu sekitar 15.5%. Hal ini disebabkan semakin meningkatnya %wt Cu, maka fluiditas dari duralumin cair akan semakin rendah. Dengan menurunnya fluiditas, maka logam cair akan sulit untuk mengisi seluruh rongga cetakan terutama bagian yang tebal sehingga hal ini dapat memicu terjadinya porositas penyusutan. Selain itu, peningkatan kadar Cu pada duralumin dapat meningkatkan temperatur lebur dari duralumin cair sehingga kadar hidrogen yang terlarut akan meningkat pula. Semakin tinggi kadar hidrogen yang terlarut dalam logam cair maka kemungkinan terperangkapnya gas saat proses solidifikasi logam cair akan semakin besar, hal ini dapat memicu porositas gas.^[30]

4.4 Analisa Simulasi *Software Z-Cast*

4.4.1 Analisa *Casting Design* Eksperimen

Simulasi dilakukan untuk memprediksi lokasi/distribusi dari porositas penyusutan yang terjadi pada produk cor, *casting design* dibuat semirip mungkin dengan *casting design* yang digunakan dalam eksperimen pengecoran, desain 3D tersebut dibuat dengan bantuan *software* Solidworks 2010 dan kemudian disimpan dalam format .STL (*Stereolithography*). Desain dari *casting design* tersebut dapat dilihat pada gambar 4.12 di bawah ini:

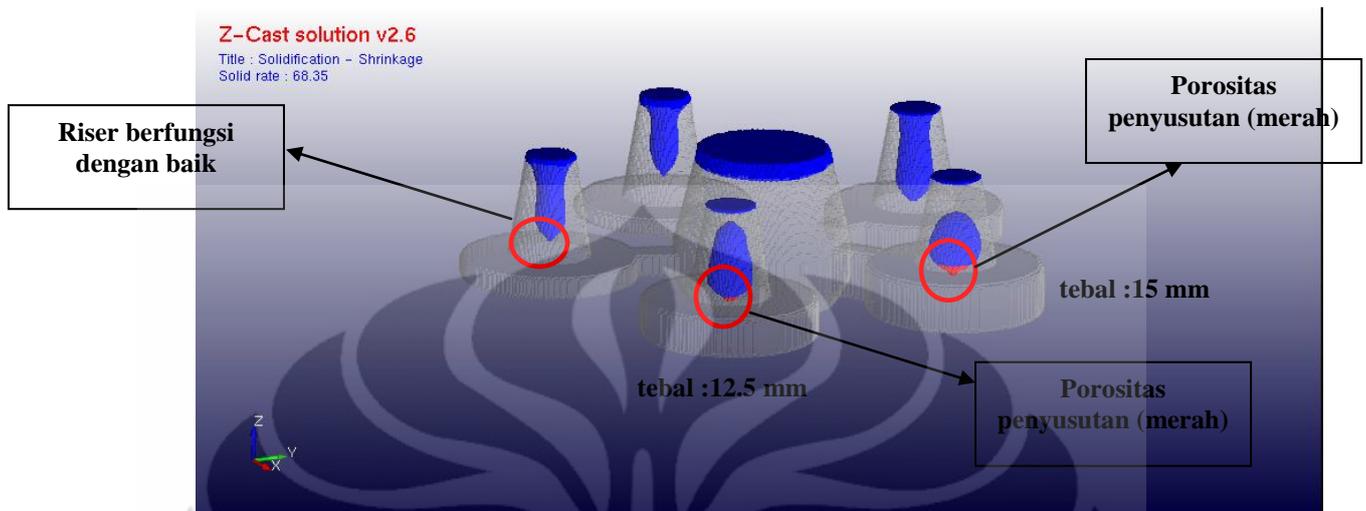
Kemudian, format .STL tersebut akan diinput ke software Z-Cast untuk disimulasikan. Berikut ini adalah pengaturan parameter di Z-Cast yang dilakukan untuk simulasi ini:

1. Material produk : AlCu4 / AC1B
2. Material cetakan : baja karbon rendah (S25C)
3. Temperatur tuang : 700° C
4. Temperatur cetakan : 300° C
5. *Critical Solid Fraction* : 70%
6. *Shrinkage %* : 8%
7. *Mesh* : 285 x 285 x 100
8. Module : *Solidification Shrinkage* dan *Solidification Temperatur*

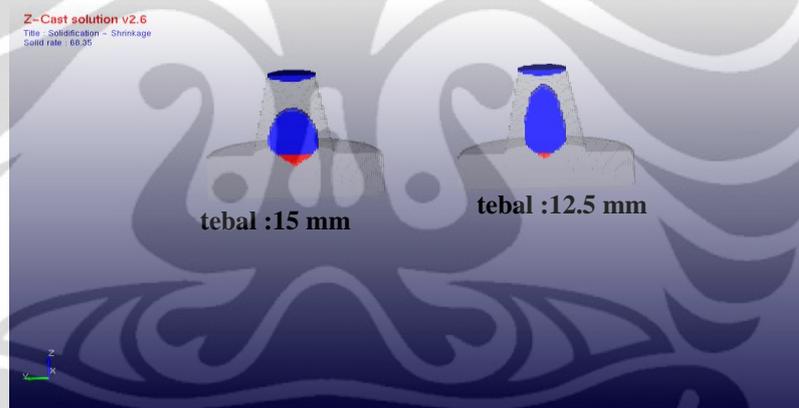
Pada eksperimen, pengecoran duralumin yang dilakukan menggunakan pengecoran sistem vakum dengan tekanan peleburan sebesar 40 cmHg dan tekanan solidifikasi sebesar 30 cmHg. Parameter tersebut *tidak* terdapat pada software Z-Cast ini, sehingga hasil simulasi yang peneliti lakukan ini dapat lebih menggambarkan prediksi lokasi/distribusi porositas penyusutan pada pengecoran tanpa sistem vakum yang tidak melibatkan tekanan peleburan dan tekanan solidifikasi.

Analisis *Solidification-Shrinkage* berfungsi untuk melihat distribusi dari porositas penyusutan yang terjadi dan analisis *Solidification-Temperatur* untuk melihat pemetaan daerah berdasarkan temperturnya saat proses solidifikasi sehingga dapat diketahui dimana bagian yang membeku terakhir. Dari hasil simulasi tersebut, dapat dilihat pada gambar 4.13, 4.14, 4.15 di bawah. Pada produk cor dengan ketebalan 5 mm, 7.5 mm, dan 10 mm tidak terdeteksi *shrinkage*, hal ini dikarenakan logam cair (indikator warna biru) yang terdapat pada *riser* pada produk tersebut membeku terakhir disaat semua bagian produk cor telah membeku terlebih dahulu, hal ini mengindikasikan *riser* relatif berfungsi dengan baik, sehingga dapat mengkompensasi penyusutan. Sedangkan pada produk cor dengan ketebalan 12.5 mm & 15 mm *riser* tidak dapat mengkompensasi penyusutan yang terjadi, sebagian dari logam cair yang terdapat pada *riser* (indikator warna merah) membeku terakhir pada bagian tengah antara dasar *riser* dan produk sehingga bagian tersebut menjadi daerah *hot-spot*. Hal

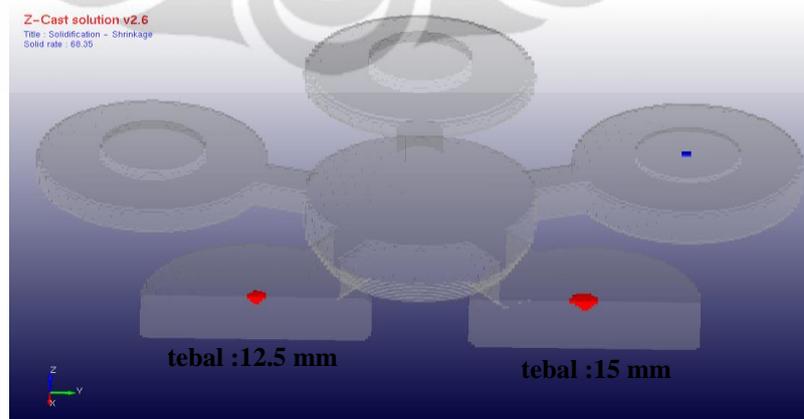
inilah yang menyebabkan porositas penyusutan cenderung terjadi di produk cor yang tebal.



Gambar 4.13 Hasil Simulasi Software Z-Cast (Module Solidification – Shrinkage)

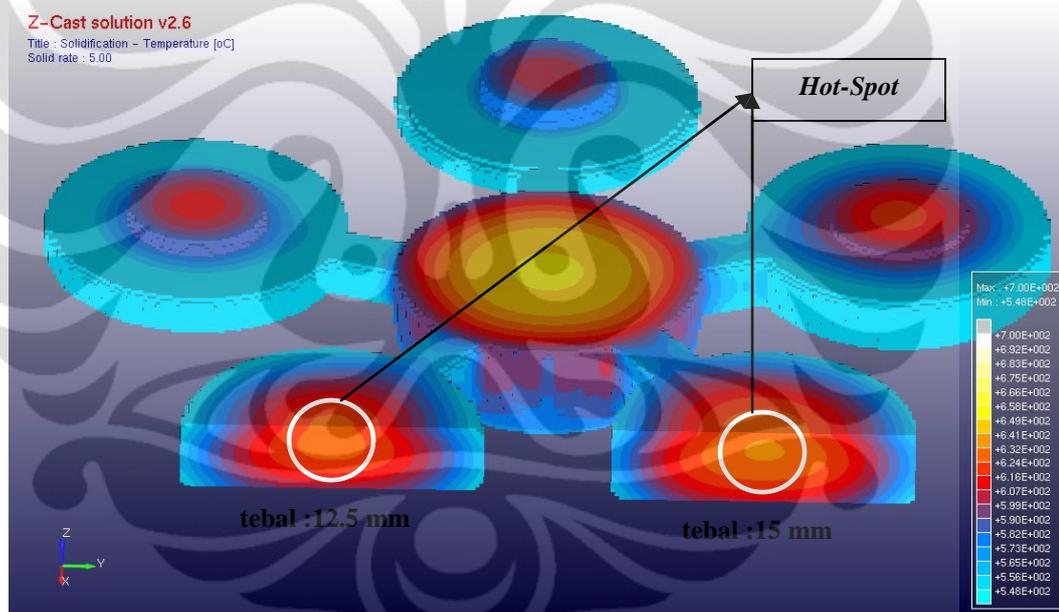


Gambar 4.14 Produk Cor dengan ketebalan 12.5 mm dan 15 mm yang dibelah vertikal (Module Solidification – Shrinkage)



Gambar 4.15 Shrinkage Pada Produk Cor dengan ketebalan 12.5 mm dan 15 mm yang dibelah horizontal (Module Solidification – Shrinkage)

Selanjutnya pada gambar 4.16 di bawah merupakan distribusi temperatur produk cor saat akhir proses solidifikasi menggunakan indikator warna. Indikator warna biru muda yang cenderung terdapat pada produk cor dengan ketebalan 5 mm, 7.5 mm, 15 mm dan sebagian dari permukaan luar produk cor dengan ketebalan 12.5 mm dan 15 mm, menyatakan temperatur 548°C ($T_{eutectic} / \text{solid}$), produk cor tipis cenderung membeku lebih dahulu dibandingkan produk cor yang tebal dengan distribusi temperatur ber-indikator-kan biru tua, ungu tua, merah, oranye (rentang temperature : 590°C - 632°C) yang menandakan daerah tersebut masih dalam keadaan *liquid* (cair), hal ini dapat memicu porositas penyusutan jika *riser* tidak berfungsi dengan baik karena bagian *liquid* (cair) tersebut akan terjebak pada saat logam menyusut.



Gambar 4.16 Hasil Simulasi Software Z-Cast (*Module Solidification – Temperature*)

Singkatnya, dari hasil simulasi yang telah dijalankan, Z-Cast memprediksi porositas penyusutan akan terjadi pada dasar *riser* di produk cor dengan ketebalan 12.5 mm dan 15 mm. Untuk mendapatkan hasil simulasi yang akurat, pengaturan parameter simulasi sebaiknya dikondisikan semirip mungkin dengan kondisi aktual eksperimen pengecoran, parameter-paramater tersebut akan menjadi faktor yang mempengaruhi keakuratan hasil simulasi yang dilakukan. Beberapa faktor-faktor tersebut antara lain: material, temperatur tuang, temperatur cetakan, *critical solid fraction*, *shrinkage %*, dan *mesh*.

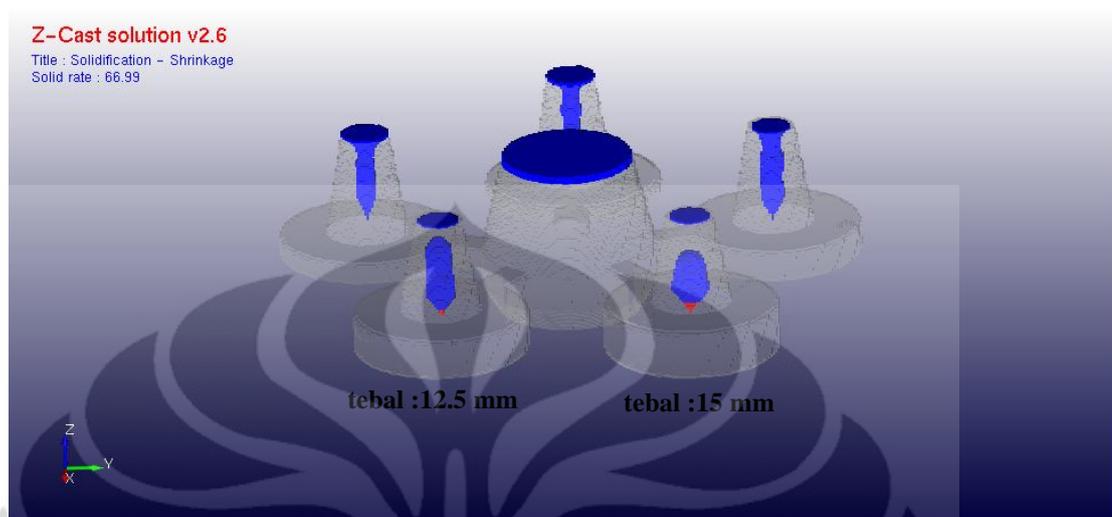
Pada faktor material, Z-Cast memiliki keterbatasan dalam memilih spesifikasi material produk yang sesuai. Alasan peneliti memilih material produk AlCu4 (AC1B) karena material tersebut merupakan material yang tersedia dalam *database* Z-Cast dan yang paling mirip dari segi komposisi unsur-unsurnya dengan duralumin yang digunakan dalam eksperimen pengecoran dan juga memiliki sifat rentang pembekuan panjang^[18]. Komposisi kimia paduan AC1B dapat dilihat pada tabel 4.4 di bawah:

Tabel 4.4 Komposisi Kimia Paduan Aluminium Tuang Menurut JIS^[31]

SPECIES		SYMBOL	Chemical Ingredient %												Reference JIS H 5202 (1982)
Alloy division	Degree of purity division		Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Mn	Ni	Ti	Pb	Sn	Cr	Al	
1species A	1	AC1A.1	4.0 ~5.0	1.2 below	0.20 below	0.30 below	0.40 below	0.30 below	0.05 below	0.25 below	0.05 below	0.05 below	0.05 below	rest	AC1A
	2	AC1A.2	4.0 ~5.0	1.2 below	0.20 below	(0.03 below)	0.30 below	(0.03 below)	(0.03 below)	0.25 below	(0.03 below)	(0.03 below)	(0.03 below)	rest	
1species B	1	AC1B.1	4.2 ~5.0	0.20 below	0.20 ~0.35	0.10 below	0.30 below	0.10 below	0.05 below	0.05 ~0.30	0.05 below	0.05 below	0.05 below	rest	AC1B
	2	AC1B.2	4.2 ~5.0	0.20 below	0.20 ~0.35	(0.03 below)	0.20 below	(0.03 below)	(0.03 below)	0.05 ~0.30	(0.03 below)	(0.03 below)	(0.03 below)	rest	

Dari tabel 4.4 di atas dapat dilihat bahwa kadar Cu pada paduan AC1B berkisar antara 4.2% - 5%, sedangkan pada eksperimen kadar Cu berkisar antara 2.5% hingga 4.5% (dapat dilihat pada tabel 4.1). Hal ini tentu saja berpengaruh terhadap hasil simulasi yang dijalankan. Untuk pengaturan parameter: material cetakan, temperatur ruang, dan temperatur cetakan dirasa sudah cukup representatif dengan kondisi eksperimen. Parameter *Critical Solid Fraction*/fraksi kritis padatan merupakan fraksi padat kritis/maksimal yang dapat membuat laju aliran logam cair berhenti ketika sudah mencapai kondisi tersebut. Berdasarkan literatur, fraksi kritis padatan untuk paduan AlCu adalah sekitar 70%^[32] sehingga hal ini dirasa sudah cukup representatif. Parameter *Shrinkage* % merupakan persentase penyusutan logam yang terjadi saat proses solidifikasi berlangsung, pada paduan aluminium rentang persentase penyusutan yang umum terjadi adalah 3,5% - 8,5%.^{[26][27]}. Alasan peneliti meng-input 8% *Shrinkage* pada pengaturan simulasi adalah sebagai prediksi seburuk-buruknya porositas penyusutan yang akan terjadi (*worst scenario*). Akan tetapi agar menambah keakuratan dan sebagai bahan pertimbangan, peneliti tetap melakukan *running* simulasi dengan *Shrinkage*

% sebesar 4% (batas bawah). Hasil dari simulasi tersebut dapat dilihat pada gambar 4.17 di bawah ini:



Gambar 4.17 Hasil Simulasi *Software Z-Cast* (*Module Solidification – Shrinkage*). *Shrinkage* : 4%

Jika dibandingkan dengan simulasi pertama pada gambar 4.13, simulasi kedua pada gambar 4.17 menghasilkan kuantitas porositas penyusutan (secara kasat mata) yang lebih sedikit jika dibandingkan pada simulasi pertama. Akan tetapi tidak terdapat perubahan pada lokasi terjadinya porositas penyusutan. Tampak pada gambar 4.17, porositas penyusutan tetap terkonsentrasi pada bagian dasar *riser* di produk cor dengan ketebalan 12.5 mm dan 15 mm.

Faktor penting lainnya yang dapat mempengaruhi keakuratan hasil simulasi adalah *Mesh*. *Mesh* merupakan diskritisasi/pembagian unit/elemen terkecil dari suatu permasalahan (*problem*). Semakin besar dan rumit geometri dari produk cor, maka *Mesh Element* nya akan semakin besar.^[31]

Mesh Element dari desain awal yang peneliti buat adalah 3317 x 3398 x 466 atau berjumlah sekitar 5 milyar elemen. Akan tetapi, peneliti mereduksi *Mesh* menjadi 285 x 285 x 100, sehingga terdapat kurang lebih hanya 8 juta elemen pada proses simulasi yang dilakukan. Semakin besar *mesh* maka semakin detail tampilan visual dari benda cor yang disimulasikan, sehingga akan semakin akurat simulasi yang dijalankan meskipun proses simulasi akan semakin memakan waktu. Proses simulasi dengan *mesh* yang tinggi dapat dilakukan lebih cepat jika spesifikasi dari komputer yang digunakan cukup memadai. Hal ini juga lah yang membatasi peneliti untuk menggunakan jumlah *Mesh* yang lebih besar.

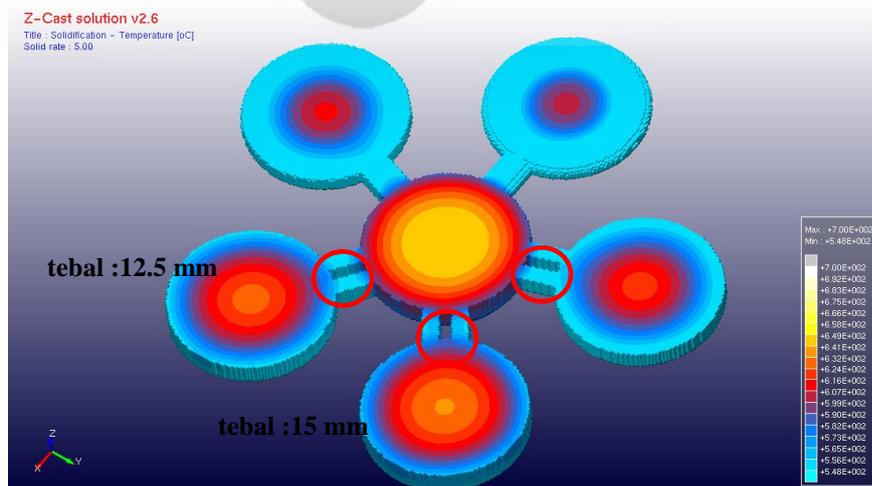
Simulasi pada variasi *casting design* produk cor ini dilakukan dengan pengaturan sebagai berikut:

1. Material produk : AlCu4 / AC1B
2. Material cetakan : S25C (baja karbon rendah)
3. Temperatur tuang : 700 °C
4. Temperatur cetakan : 300 °C
5. *Critical Solid Fraction* : 70%
6. Shrinkage % : 8%
7. *Mesh* : 285 x 285 x 100
8. Module : *Solidification Shrinkage* dan *Solidification Temperatur*

Berikut ini adalah gambar 4.19 dan 4.20 yang merupakan hasil dari simulasi tersebut:

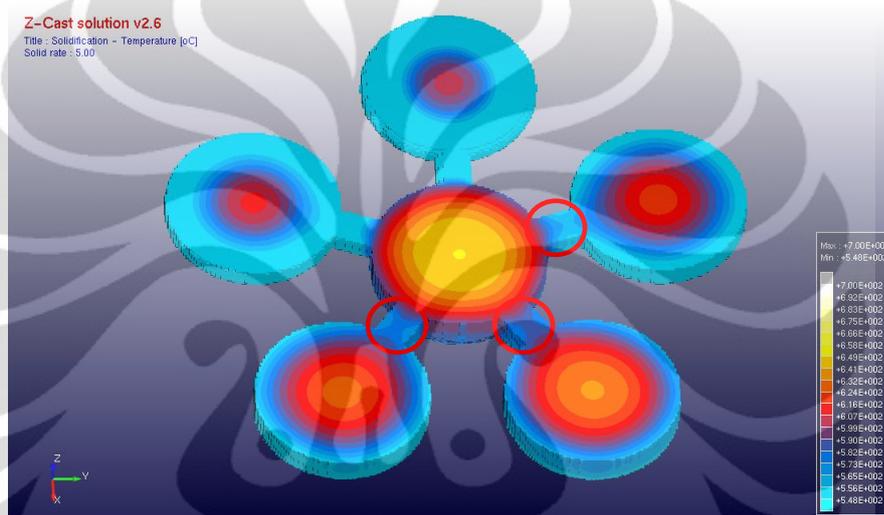


Gambar 4.19 Module *Solidification-Shrinkage* (variasi casting design)



Gambar 4.20 Module *Solidification-Temperature* (variasi casting design)

Pada gambar 4.19 di atas dapat dilihat bahwa porositas penyusutan terdistribusi di bagian dasar riser (indikator berwarna merah) produk cor yang mempunyai ketebalan 12.5 mm dan 15 mm. Sedangkan pada gambar 4.20 di atas dapat dilihat persebaran temperatur yang pada bagian produk cor dengan indikator warna yang berbeda-beda. Produk cor dengan indikator biru tua, ungu, merah, dan oranye memiliki rentang temperatur 590 – 632 °C, merupakan produk cor yang terakhir membeku. Sedangkan indikator warna biru muda menandakan produk cor tipis yang sudah membeku terlebih dahulu (548 °C).



Gambar 4.21 *Module Solidification-Temperature* (desain awal)

Jika dibandingkan dengan hasil simulasi dari desain aktual eksperimen (dapat dilihat pada gambar 4.13), dapat dikatakan tidak ada perubahan yang signifikan dari segi kuantitas dan distribusi dari porositas penyusutan yang terjadi secara kasat mata. Begitu juga dengan perbandingan hasil dari analisis *Solidification – Temperature*, kedua desain memiliki persebaran temperatur yang mirip (4.20 dengan 4.21). Tetapi jika dilihat lebih teliti, dari distribusi temperatur pada bagian *ingate* desain modifikasi pada gambar 4.20 (ditandai dengan lingkaran merah) didapatkan bahwa persebaran temperatur pada bagian tersebut memiliki persamaan dengan persebaran temperatur dengan bagian permukaan produk cor, ditandai dengan indikator warna biru muda (548 °C). Sedangkan distribusi temperatur pada bagian *ingate* desain awal pada gambar 4.21, didapatkan bahwa distribusi temperaturnya relatif tinggi, diindikasikan dengan indikator warna biru tua (590 °C). Temperatur 590 °C menandakan daerah

tersebut masih *liquid* (cair), daerah sambungan tersebut akan lebih rentan terkena porositas penyusutan karena perbedaan densitas cair dan padat. Sehingga dapat ditarik kesimpulan bahwa desain dengan modifikasi *ingate* pada gambar 4.20 (ukuran lebar masing-masing *ingate*: 5 mm, dan diberi jarak 3 mm antara kedua *ingate*) akan lebih ideal dalam meminimalisir cacat porositas penyusutan.



BAB V KESIMPULAN

1. Penyusutan luar terjadi pada permukaan produk cor dengan ketebalan 12.5 mm dan 15 mm akibat *preheating mold* hingga 300 °C. Sebaliknya, produk dengan ketebalan 5 mm, 7.5 mm, dan 10 mm memiliki permukaan yang halus dan sesuai cetakan.
2. Porositas penyusutan dalam yang terkonsentrasi pada dasar *riser* terjadi pada produk cor dengan ketebalan 12.5 mm dan 15 mm hasil eksperimen.
3. Hasil simulasi *software Z-Cast* memprediksi penyusutan dalam pada produk cor dengan ketebalan 12.5 mm dan 15 mm tetapi tidak memprediksi penyusutan luar sebagaimana yang terjadi pada produk cor hasil eksperimen.
4. Produk yang paling minim porositas rata-ratanya adalah produk dengan kadar minimal Cu dan maksimal ketebalan (Al2.5Cu ketebalan 15 mm) dengan kadar porositas rata-rata sebesar 8.47%. Produk yang paling banyak porositas rata-ratanya adalah produk dengan kadar maksimal Cu dan minimal ketebalan (Al4.5Cu ketebalan 5 mm) dengan kadar porositas rata-rata sebesar 15.29%.
5. Jenis porositas yang dominan terjadi pada produk hasil pengecoran sistem vakum adalah porositas penyusutan.
6. Jenis porositas penyusutan makro yang terjadi adalah *Shrinkage Sponge*.
7. Temperatur tuang pengecoran duralumin sebesar 700°C (*superheat* 50 °C) menghasilkan produk cor minim cacat *misrun*.
8. Pengecoran sistem vakum dengan P_{melt} : 40 cmHg dan $P_{solidification}$: 30 cmHg meminimalisir cacat porositas gas pada produk coran.
9. Simulasi *software Z-Cast* terhadap variasi *casting design* dengan modifikasi *ingate* memperlihatkan desain yang lebih ideal (gambar 4.18) dalam meminimalisir cacat porositas penyusutan jika dibandingkan dengan desain aktual eksperimen pengecoran (gambar 4.12).

Daftar Referensi

1. Das Subodh and Yin Weimin, *Trends in the Global Aluminium Fabrication Industry*, JOM, 2007, hal.83.
2. Wahyono Suprpto, Bambang Suharno, Johny Wahyuadi Soedarsono, Dedi Priadi, *Effect of Copper and Air Blocking on Porosity Defect of Duralumin Cast*. IJMEI Volume 5. ISME 1. 2011
3. *Metals & Alloys in the United Numbering System (UNS)*, 10th Edition. ASTM, 2008.
4. ASM Handbook. Volume 2, In *Properties and Selection: Nonferrous alloys and special purpose materials*. ASM, 2002.
5. Marisa di Sabatino and Lars Arnberg, *Castability of aluminium alloys*, Transactions of The Indian Institute of Metals, Vol. 62, Issues 4-5, August-October 2009, hal.321-325.
6. Pakpahan P. Posma, *Identifikasi Cacat Gas dan Cacat Penyusutan Pada Benda Tuang Kuningan*. Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 1986, hal 33.
7. G William, Walkington. *Die Casting Defects : Causes and Solutions*. NADCA, 43-44
8. Aremo B and Adeoye, *A Low-Cost Vacuum Casting Equipment for Aluminium Alloys*, Abstract. 2010.
9. I. J. Polmear, *Light Alloys*, Arnold, 1995
10. Bambang, Suharno. *Diktat Kuliah Pengecoran Aluminium*. 2009. Depok. Departemen Metalurgi dan Material. 2009.
11. R.E. Sanders, Technology Innovation in aluminium Products, *The Journal of The Minerals*,53, 2001, hal.21-25
12. J. Dwight. *Aluminium Design and Construction*. Routledge, 1999.
13. *Section Manual Book Low Pressure Die Casting*. PT Astra Honda Motor.
14. http://www.aluminiumlearning.com/html/images/phase/Al_Cu.gif diakses pada Rabu, 13 April 2011 pukul 19.00 WIB.
15. ASM Handbook. *Volume 15 : Casting*. ASM International : Metal Park, Ohio, 1988.

16. D.A Porter, K.E Easterling. *Phase Transformations In Metals and Alloys 2nd Edition*, 1991, hal.184-185
17. D.A Porter, K.E Easterling. *Phase Transformations In Metals and Alloys 2nd Edition*, 1991, hal.186-192
18. Campbell, John; Harding, Richard. *The Fluidity of Molten Metal*. TALAT Lecture 3205. European Aluminium Association. 1994
19. <http://suprpto-5315077624.blogspot.com/> diakses pada Rabu, 13 April 2011 pukul 19.00 WIB.
20. G. Rudi. “*Pengecoran Tembaga Tuang*”. Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 1986, hal 48.
21. G. Rudi. “*Pengecoran Tembaga Tuang*”. Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 1986, hal 62-67.
22. ASTM Handbook. Volume , In *Metallography and Microstructure*. ASTM, 2002.
23. *Modul Training Z-Cast Software*. Korea Indonesia Casting Center.2010
24. SA Calcom, *Simulating Porosity In Ductile Iron Casting*. Switzerland
25. Campbell John, TALAT Lecture 3207: Solidification Defects in Casting. European Aluminium Association. 1994
26. Davis R. Joseph, *Aluminium and Aluminium Alloys*. ASM International. Handbook Comitte. page 114.
27. Joshi M Amit, *Aluminium Foundry Practice*. India Institute of Technology, India.
28. Seto Demas, Pengaruh Unsur Tembaga (Cu) Terhadap Kekerasan dan Fluiditas Aluminium Paduan ADC12 Dengan Metode Vacuum Suction Test. Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 2006. hal 25-26.
29. Dan VanderBoon, *Effect of Solidification Rate on Porosity Formation and Cast Microstructure in Aluminium Alloy A356*, Padnos College of Engineering & Computing, Grand Valley State University, 2005
30. Laboratorium Metalurgi Proses Departemen Metalurgi dan Material FTUI. 2010. *Modul Praktikum Pasir Cetak dan Pengecoran*. Laboratorium Metalurgi Proses Departemen Metalurgi dan Material FTUI : Depok
31. JIS Standard for *Aluminium Alloy*

32. Tan Lijian, Zabarar Nicholas, *A thermomechanical study of the effects of mold topography on the solidification of Aluminum alloys*,
33. Lundback Andreas, *Finite Element Modelling and Simulation of Welding of Aerospace Components*. Departments of Applied Physics and Mechanical Engineering , Division of Computer Aided Design. 2003.



Lampiran. 1

Tabel. 1 Data Hasil Pengujian Densitas Al -2.5Cu

Al -2.5Cu Densitas Teoritis : 2.855 gr/cm ³							
Tebal (mm)	Wa	Ws	Wfz	Wwk	Wk	Ysp	Porositas %
5	28.60	228.16	207.10	21.06	3.86	2.50	12.12
5	28.60	228.16	207.13	21.03	3.86	2.50	12.35
5	28.60	228.16	206.99	21.17	3.86	2.53	11.27
Rata-rata							11.91
7.5	38.39	228.16	201.05	27.11	3.86	2.53	11.18
7.5	38.39	228.16	201.02	27.14	3.86	2.54	11.01
7.5	38.39	228.16	201.35	26.81	3.86	2.48	12.91
Rata-rata							11.70
10	49.41	228.16	194.03	34.13	3.86	2.58	9.57
10	49.41	228.16	194.9	33.26	3.86	2.46	13.51
10	49.41	228.16	194.21	33.95	3.86	2.55	10.42
Rata-rata							11.17
12.5	58.03	228.16	188.91	39.25	3.86	2.56	10.224
12.5	58.03	228.16	188.64	39.52	3.86	2.59	9.13
12.5	58.03	228.16	188.82	39.34	3.86	2.57	9.864
Rata-rata							9.74
15	69.32	228.16	181.38	46.78	3.86	2.62	8.02
15	69.32	228.16	181.54	46.62	3.86	2.60	8.58
15	69.32	228.16	181.61	46.55	3.86	2.60	8.82
Rata-rata							8.47

Lampiran. 2

Tabel. 2 Data Hasil Pengujian Densitas Al-3Cu

Al-3Cu Densitas Teoritis : 2.886 gr/cm ³							
Tebal (mm)	Wa	Ws	Wfz	Wwk	Wk	Ysp	Porositas %
5	28.67	228.16	206.82	21.34	3.86	2.56	11.22
5	28.67	228.16	206.98	21.18	3.86	2.52	12.47
5	28.67	228.16	207.12	21.04	3.86	2.49	13.54
Rata-rata							12.41
7.5	38.32	228.16	200.96	27.2	3.86	2.55	11.36
7.5	38.32	228.16	201.02	27.14	3.86	2.54	11.71
7.5	38.32	228.16	201.03	27.13	3.86	2.54	11.77
Rata-rata							11.61
10	49.62	228.16	194.03	34.13	3.86	2.56	11.14
10	49.62	228.16	194.22	33.94	3.86	2.53	12.00
10	49.62	228.16	193.78	34.38	3.86	2.59	9.98
Rata-rata							11.04
12.5	58.32	228.16	188.12	40.04	3.86	2.63	8.72
12.5	58.32	228.16	188.55	39.61	3.86	2.58	10.46
12.5	58.32	228.16	188.34	39.82	3.86	2.60	9.62
Rata-rata							9.60
15	69.39	228.16	181.12	47.04	3.86	2.64	8.26
15	69.39	228.16	181.24	46.92	3.86	2.63	8.68
15	69.39	228.16	181.39	46.77	3.86	2.62	9.20
Rata-rata							8.71

Lampiran. 3

Tabel. 3 Data Hasil Pengujian Densitas Al –3.5Cu

Al- 3.5Cu Densitas Teoritis : 2.917 gr/cm ³							
Tebal (mm)	Wa	Ws	Wfz	Wwk	Wk	Ysp	Porositas %
5	28.89	228.16	207.10	21.06	3.86	2.47	15.27
5	28.89	228.16	207.03	21.13	3.86	2.48	14.76
5	28.89	228.16	206.89	21.27	3.86	2.51	13.72
Rata-rata							14.59
7.5	39.09	228.16	200.75	27.41	3.86	2.51	13.76
7.5	39.09	228.16	200.42	27.74	3.86	2.57	11.89
7.5	39.09	228.16	200.65	27.51	3.86	2.53	13.20
Rata-rata							12.95
10	50.02	228.16	193.74	34.42	3.86	2.57	11.88
10	50.02	228.16	193.61	34.55	3.86	2.58	11.28
10	50.02	228.16	193.66	34.50	3.86	2.58	11.51
Rata-rata							11.56
12.5	58.13	228.16	188.11	40.05	3.86	2.64	9.17
12.5	58.13	228.16	188.32	39.84	3.86	2.62	10.036
12.5	58.13	228.16	188.41	39.75	3.86	2.61	10.39
Rata-rata							9.86
15	69.47	228.16	180.98	47.18	3.86	2.65	8.92
15	69.47	228.16	181.03	47.13	3.86	2.65	9.10
15	69.47	228.16	180.91	47.25	3.86	2.66	8.68
Rata-rata							8.90

Lampiran. 4

Tabel. 4 Data Hasil Pengujian Densitas Al-4Cu

Al-4Cu Densitas Teoritis : 2.948 gr/cm ³							
Tebal (mm)	Wa	Ws	Wfz	Wwk	Wk	Ysp	Porositas %
5	28.82	228.16	207.22	20.94	3.86	2.45	16.72
5	28.82	228.16	207.08	21.08	3.86	2.48	15.72
5	28.82	228.16	206.81	21.35	3.86	2.54	13.71
Rata-rata							15.38
7.5	38.39	228.16	200.96	27.2	3.86	2.55	13.47
7.5	38.39	228.16	201.12	27.04	3.86	2.52	14.38
7.5	38.39	228.16	200.63	27.53	3.86	2.60	11.53
Rata-rata							13.12
10	49.79	228.16	194.13	34.03	3.86	2.53	13.91
10	49.79	228.16	193.22	34.94	3.86	2.66	9.73
10	49.79	228.16	193.48	34.68	3.86	2.61	10.96
Rata-rata							11.53
12.5	58.37	228.16	187.92	40.24	3.86	2.65	9.957
12.5	58.37	228.16	187.45	40.71	3.86	2.71	7.99
12.5	58.37	228.16	187.31	40.85	3.86	2.73	7.39
Rata-rata							8.44
15	69.52	228.16	180.71	47.45	3.86	2.68	9.05
15	69.52	228.16	180.99	47.17	3.86	2.65	10.02
15	69.52	228.16	180.14	48.02	3.86	2.74	7.01
Rata-rata							8.69

Lampiran. 5

Tabel. 5 Data Hasil Pengujian Densitas Al –4.5Cu

Al- 4.5Cu Densitas Teoritis : 2.979 gr/cm ³							
Tebal (mm)	Wa	Ws	Wfz	Wwk	Wk	Ysp	Porositas %
5	29.19	228.16	206.83	21.33	3.86	2.49	16.39
5	29.19	228.16	206.33	21.83	3.86	2.60	12.66
5	29.19	228.16	206.89	21.27	3.86	2.47	16.82
Rata-rata							15.29
7.5	39.17	228.16	199.81	28.35	3.86	2.66	10.437
7.5	39.17	228.16	200.37	27.79	3.86	2.57	13.72
7.5	39.17	228.16	200.24	27.92	3.86	2.59	12.98
Rata-rata							12.37
10	50.11	228.16	193.34	34.82	3.86	2.61	12.16
10	50.11	228.16	193.44	34.72	3.86	2.60	12.61
10	50.11	228.16	193.12	35.04	3.86	2.64	11.14
Rata-rata							11.97
12.5	58.16	228.16	187.97	40.19	3.86	2.67	10.56
12.5	58.16	228.16	187.66	40.50	3.86	2.70	9.27
12.5	58.16	228.16	187.81	40.35	3.86	2.68	9.90
Rata-rata							9.92
15	69.61	228.16	180.12	48.04	3.86	2.73	8.11
15	69.61	228.16	180.31	47.85	3.86	2.71	8.79
15	69.61	228.16	180.46	47.7	3.86	2.70	9.32
Rata-rata							8.74