

**PENGARUH LAJU PENDINGINAN TERHADAP POROSITAS DAN
STRUKTUR MIKRO CORAN *PULLEY* Al-Zn DENGAN
*PERMANENT MOLD***

**SKRIPSI
TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK MATERIAL**

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



**LUQMAN BAIHAQI
NIM. 145060207111005**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2018**

LEMBAR PENGESAHAN
PENGARUH LAJU PENDINGINAN TERHADAP POROSITAS DAN
STRUKTUR MIKRO CORAN *PULLEY* Al-Zn DENGAN
PERMANENT MOLD

SKRIPSI

TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK MATERIAL

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



LUQMAN BAIHAQI
NIM. 145060207111005

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing
pada tanggal 16 Juli 2018

DOSEN PEMBIMBING I

Dr. Ir. Wahyono Suprpto, MT.Met
NIP 19551117 198601 1 001

DOSEN PEMBIMBING II

Bayu Satriya Wardhana, ST., M.Eng
NIP 19841007 201212 1 001

Mengetahui,
KETUA PROGRAM STUDI S1



Dr. Eng. Mega Nnr Sasongko, ST., MT.
NIP 19740930 200012 1 001



LEMBAR PENGESAHAN
PENGARUH TEMPERATUR *PREHEATING* CETAKAN PERMANEN
TERHADAP POROSITAS DAN MIKROSTRUKTUR CORAN
PADUAN ALUMINIUM

SKRIPSI

TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK MATERIAL

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



LUQMAN BAIHAQI
NIM. 145060207111005

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing
pada tanggal 16 Juli 2018

DOSEN PEMBIMBING I

DOSEN PEMBIMBING II

Dr. Ir. Wahyono Suprpto, MT.Met
NIP 19551117 198601 1 001

Bayu Satriya Wardhana, ST., M.Eng
NIP 19841007 201212 1 001

Mengetahui,
KETUA PROGRAM STUDI S1

Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT.
NIP 19740930 200012 1 001

JUDUL SKRIPSI :

PENGARUH LAJU PENDINGINAN TERHADAP POROSITAS DAN STRUKTUR
MIKRO CORAN *PULLEY* Al-Zn DENGAN *PERMANENT MOLD*

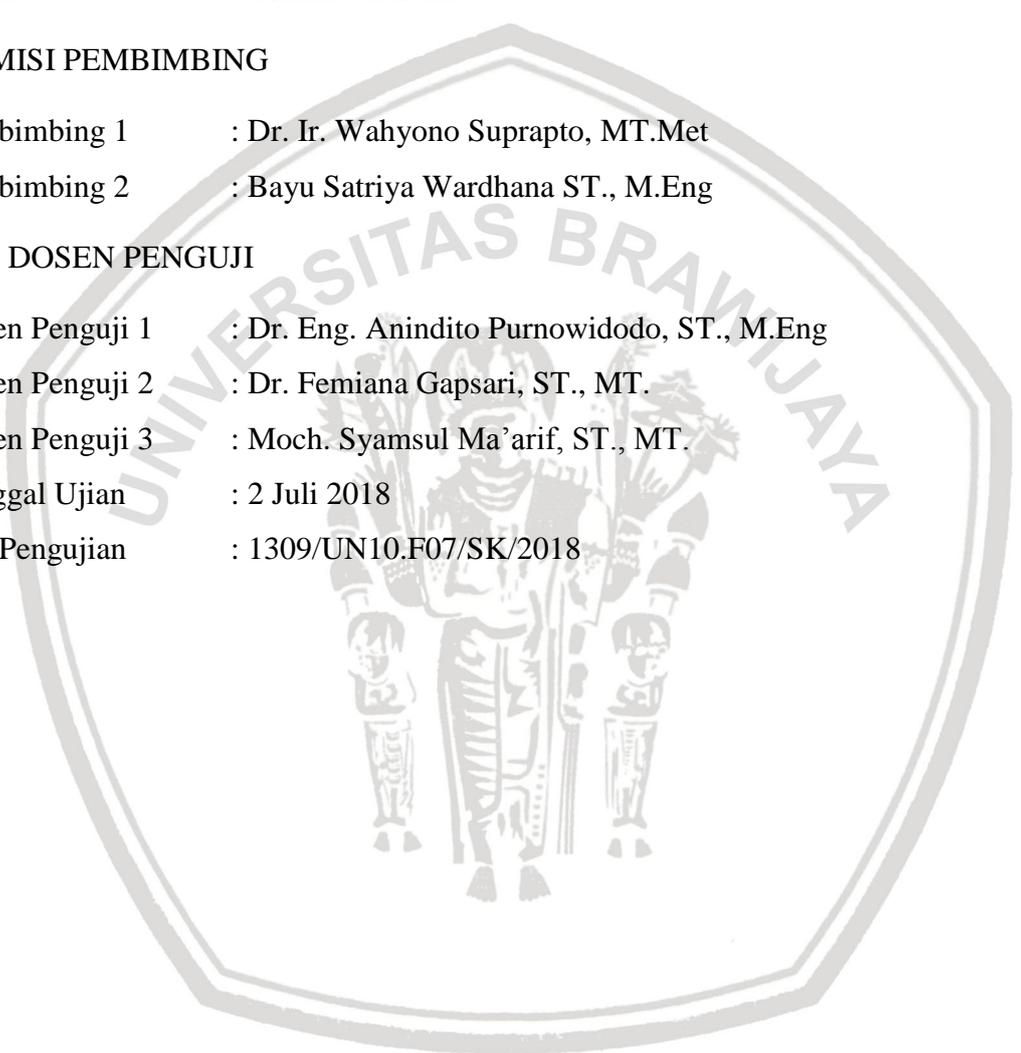
Nama Mahasiswa : Luqman Baihaqi
NIM : 145060207111005
Program Studi : Teknik Mesin
Minat : Teknik Material

KOMISI PEMBIMBING

Pembimbing 1 : Dr. Ir. Wahyono Suprpto, MT.Met
Pembimbing 2 : Bayu Satriya Wardhana ST., M.Eng

TIM DOSEN PENGUJI

Dosen Penguji 1 : Dr. Eng. Anindito Purnowidodo, ST., M.Eng
Dosen Penguji 2 : Dr. Femiana Gapsari, ST., MT.
Dosen Penguji 3 : Moch. Syamsul Ma'arif, ST., MT.
Tanggal Ujian : 2 Juli 2018
SK. Pengujian : 1309/UN10.F07/SK/2018



PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 16 Juli 2018
Mahasiswa,



Luqman Baihaqi
NIM. 145060207111005

PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan, dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya, tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu perguruan tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi dipatahkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 16 Juli 2017

Mahasiswa,

Luqman Baihaqi

NIM. 145060207111005

UNIVERSITAS BRAWIJAYA





**UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM SARJANA**



SERTIFIKAT BEBAS PLAGIASI

Nomor : 116/UN10.F07.12.21/PP/2018

Sertifikat ini diberikan kepada :

LUQMAN BAIHAQI

Dengan Judul Skripsi :

**PENGARUH LAJU PENDINGINAN TERHADAP POROSITAS DAN STRUKTUR MIKRO
CORAN PULLEY Al Zn DENGAN PERMANENT MOLD**

Telah dideteksi tingkat plagiasinya dengan kriteria toleransi $\leq 20\%$, dan
dinyatakan Bebas dari Plagiasi pada tanggal **17 JUL 2018**



Ketua Jurusan Teknik Mesin

Ir. Djarot B. Darmadi, MT., Ph.D

NIP. 19670518 199412 1 001

Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin

Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT.

NIP. 19740930 200012 1 001



*Satu lagi tahap dalam hidupku akan segera berlalu.
Teriring Ucapan Terima Kasih kepada:
Bapak dan Ibu tercinta
Kedua saudari dan keluarga besar tersayang*

PENGANTAR

Assalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan segala rahmat serta hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan kerja prakti **Pengaruh Laju Pendinginan Terhadap Porositas dan Struktur Mikro Coran *Pulley Al-Zn dengan Permanent Mold*** yang merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST.) di Jurusan Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya.

Selama penyusunan Skripsi ini, penulis mendapatkan banyak saran, bimbingan, bantuan, maupun semangat dari berbagai pihak baik langsung maupun tidak langsung. Oleh karena itu pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Kedua Orang Tua, Kedua saudari, dan keluarga besar saya yang selalu mendoakan, mendukung, dan memberikan semangat tanpa kenal lelah kepada penulis.
2. Bapak Ir. Djarot B. Darmadi MT. P.hD, dan Bapak Teguh Dwi Widodo, ST., M.Eng P.hD selaku Ketua Jurusan dan Sekretaris Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
3. Bapak Dr. Ir. Wahyono Suprpto MT.Met. selaku Dosen Pembimbing I dan Ketua Kelompok Dosen Konsentrasi Teknik Material, dan Bapak Bayu Satriya Wardhana, ST., M.Eng selaku Dosen Pembimbing II yang telah memberikan ilmu, bimbingan, dan arahnya kepada penulis selama proses penyusunan tugas akhir.
4. Bapak Khairul Anam, ST., M.Sc. dan Bapak Purnami ST., MT. yang telah memberikan masukan dan saran kepada penulis saat seminar proposal.
5. Bapak Dr. Eng. Anindito Purnowidodo, ST., M.Eng., Ibu Dr. Femiana Gapsari, ST., MT, dan Bapak Moch. Syamsul Ma'arif, ST., MT, selaku dosen penguji sidang komprehensif yang telah memberikan banyak masukan untuk tugas akhir penulis.
6. Mas Andi, Mas Tian dan Mas Okky selaku instruktur laboratorium $\alpha\beta\gamma$ Landungsari yang telah membantu dan mengajarkan kepada penulis dalam melakukan penelitian.
7. Asisten Laboratorium Proses Produksi I, Metalurgi Fisik, dan Pengecoran Logam yang telah membantu penulis dalam persiapan pengambilan data penelitian.
8. Siti Amalina Azahra, Putri Rahayu, Adinda Rahmah S, dan Abdan Maskur, teman-teman seperjuangan skripsi yang selalu memberikan semangat, mau membagi waktu dan ilmunya kepada penulis selama 10 bulan terakhir, semoga kalian selalu terjaga.

9. Seluruh teman-teman MAF14 Teknik Mesin Angkatan 2014 Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, tempat dimana penulis selalu memiliki orang-orang untuk bersandar, selalu menghibur, dan selalu bersemangat, semoga semua urusan kalian selalu dimudahkan.
10. Seluruh teman-teman YPK A25 khususnya region Malang yang selalu memberikan semangat dan masukan kepada penulis selama mengerjakan tugas akhir.
11. Warga Kontrakan KBMT, Kusuma Adi, Yogi Tio Bagaskoro, dan Muhammad Hadyan Baqi yang telah berbagi tempat tinggal dengan penulis selama mengerjakan tugas akhir.
12. Serta semua pihak yang secara langsung maupun tidak langsung ikut terlibat dalam penyusunan tugas akhir ini,

Penulis menyadari bahwa penyusunan tugas akhir ini masih jauh dari sempurna, oleh karena itu penulis mengharapkan segala kritik dan saran yang membangun untuk penulisan tugas akhir ini agar menjadi lebih baik lagi. Semoga tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi kita semua baik penulis, maupun pembaca nantinya. Kurang lebihnya penulis ucapkan mohon maaf, akhir kata penulis ucapkan terima kasih.

Malang, 16 Juli 2018

Penulis

DAFTAR ISI

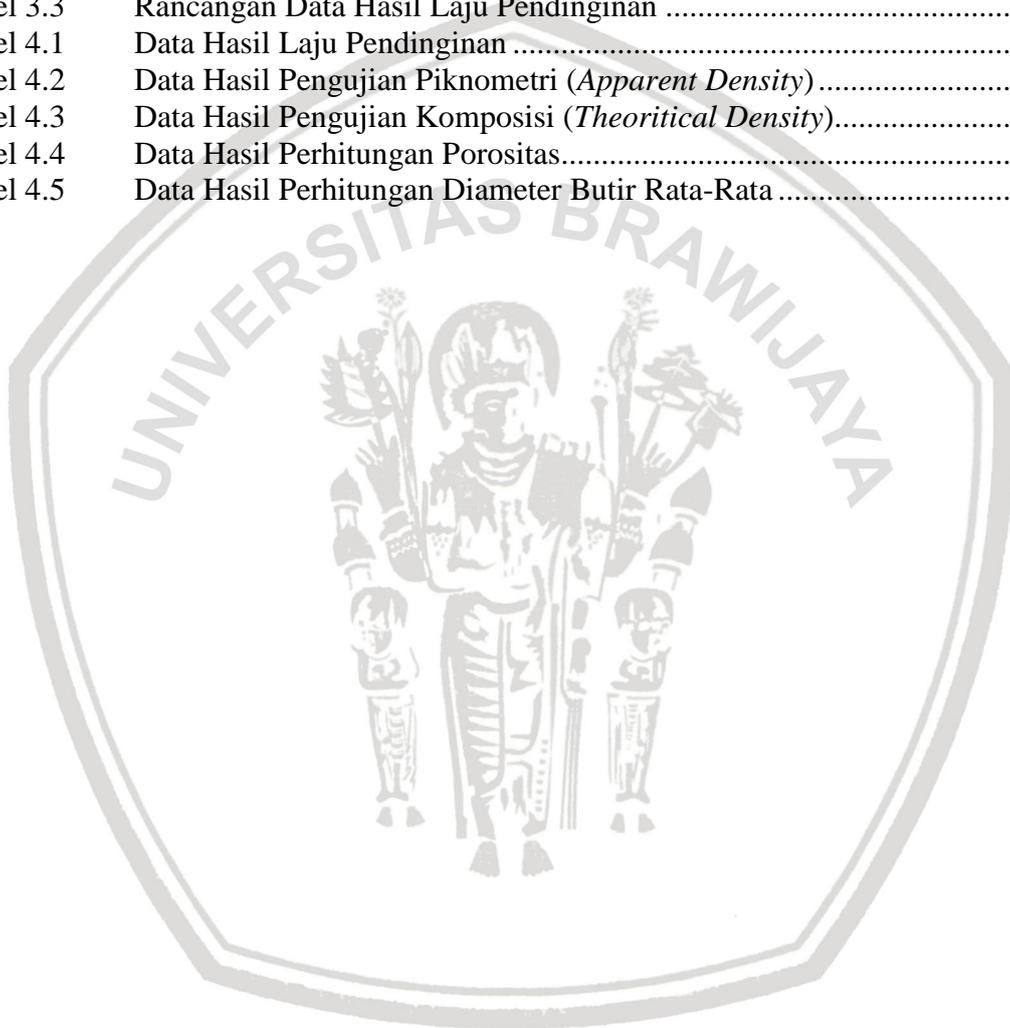
	Halaman
PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR LAMPIRAN	vii
RINGKASAN	viii
SUMMARY	ix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan Penelitian.....	2
1.5 Manfaat Penelitian.....	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1 Penelitian Sebelumnya.....	3
2.2 Paduan Al-Zn.....	4
2.3 Kelarutan Gas dalam Paduan Al-Zn.....	4
2.4 Pengecoran Logam.....	6
2.5 Peleburan.....	7
2.6 Solidifikasi.....	7
2.7 Laju Pendinginan.....	9
2.8 Konduktivitas Termal.....	10
2.9 Massa Jenis.....	10
2.10 Porositas.....	11
2.11 Piknometri.....	12
2.12 Metalografi.....	12
2.13 Perhitungan Diameter Butir (Planimetri).....	15
2.14 Hipotesis.....	17
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	19
3.1 Jenis Penelitian.....	19
3.2 Tempat Dan Waktu Penelitian.....	19
3.3 Variabel Penelitian.....	19
3.3.1 Variabel Bebas.....	19
3.3.2 Variabel Terikat.....	19
3.3.3 Variabel Terkontrol.....	20
3.4 Alat dan Bahan.....	20
3.4.1 Alat.....	20
3.4.2 Bahan.....	25
3.5 Prosedur Penelitian.....	26
3.5.1 Prosedur Pengecoran Logam.....	26
3.5.2 Prosedur Pengujian Porositas.....	26



3.5.3	Prosedur Pengujian Struktur Mikro	26
3.6	Skema Penelitian	27
3.7	Dimensi Benda Kerja	27
3.8	Rancangan Tabel dan Grafik Penelitian	27
3.8.1	Rancangan Tabel Penelitian	27
3.8.2	Rancangan Grafik Penelitian (diestimasi)	28
3.9	Diagram Alir Penelitian	29
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		31
4.1	Data Hasil Pengujian	31
4.1.1	Data Hasil Pengujian Laju Pendinginan	31
4.1.2	Data Hasil Pengujian Piknometri	31
4.1.3	Data Hasil Pengujian Komposisi	32
4.1.4	Data Hasil Perhitungan Porositas	34
4.1.5	Data Hasil Pengujian Struktur Mikro	34
4.1.5.1	Perhitungan Ukuran Butir ASTM	35
4.1.5.2	Perhitungan Diameter Butir Rata-Rata	36
4.2	Grafik dan Pembahasan	37
4.2.1	Pengaruh Media Pendinginan Terhadap Laju Pendinginan	37
4.2.2	Pengaruh Laju Pendinginan Terhadap Massa Jenis	38
4.2.3	Pengaruh Laju Pendinginan Terhadap Porositas	39
4.2.4	Pengaruh Laju Pendinginan Terhadap Struktur Mikro (Diameter Butir)	40
BAB V PENUTUP		41
5.1	Kesimpulan	41
5.2	Saran	41
DAFTAR PUSTAKA		
LAMPIRAN		

DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Kelarutan Hidrogen Dalam Aluminium Cair.....	5
Tabel 2.2	Nilai Konduktivitas Termal Beberapa Material.....	10
Tabel 2.3	Cairan etsa dalam Pengujian Mikrostruktur	14
Tabel 2.4	Hubungan Antara Perbesaran dengan Faktor Pengali Jeffries untuk Area 5000 mm ²	16
Tabel 2.5	<i>Grain Size Relationship</i>	17
Tabel 3.1	Rancangan Data Hasil <i>Apparent Density</i>	27
Tabel 3.2	Rancangan Data Hasil Perhitungan Porositas.....	28
Tabel 3.3	Rancangan Data Hasil Laju Pendinginan	28
Tabel 4.1	Data Hasil Laju Pendinginan	31
Tabel 4.2	Data Hasil Pengujian Piknometri (<i>Apparent Density</i>).....	32
Tabel 4.3	Data Hasil Pengujian Komposisi (<i>Theoretical Density</i>).....	33
Tabel 4.4	Data Hasil Perhitungan Porositas.....	34
Tabel 4.5	Data Hasil Perhitungan Diameter Butir Rata-Rata	36



DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Diagram fasa biner semu Al-Zn.....	4
Gambar 2.2	Kelarutan hidrogen dalam aluminium	5
Gambar 2.3	Proses Solidifikasi.....	7
Gambar 2.4	Proses pembentukan butir pada cetakan	8
Gambar 2.5	Kurva pendinginan pada logam dalam pengecoran	9
Gambar 2.6	<i>Interdendritic porosity</i> dan <i>gas porosity</i>	12
Gambar 2.7	Instalasi pengujian piknometri	12
Gambar 2.8	Contoh butiran	15
Gambar 3.1	Tungku peleburan	20
Gambar 3.2	Cetakan permanen.....	21
Gambar 3.3	<i>Thermogun type TM 969</i>	21
Gambar 3.4	Kamera SLR.....	21
Gambar 3.5	Jangka sorong digital	22
Gambar 3.6	<i>Thermocouple type K</i>	22
Gambar 3.7	<i>Data logger</i>	22
Gambar 3.8	Timbangan elektrik	23
Gambar 3.9	Kertas amplas.....	23
Gambar 3.10	Kain flanel.....	23
Gambar 3.11	Alat uji piknometri.....	24
Gambar 3.12	Alat uji mikrostruktur	24
Gambar 3.13	Aluminium ingot Al-Zn	25
Gambar 3.14	<i>Metal polish</i>	25
Gambar 3.15	Cairan etsa.....	25
Gambar 3.16	Skema Penelitian.....	27
Gambar 3.17	Grafik hubungan antara laju pendinginan terhadap porositas	28
Gambar 3.18	Grafik hubungan antara laju pendinginan terhadap diameter butir rata-rata	28
Gambar 4.1	Mikrostruktur coran dengan media pendingin (a) pasir, (b) baja, (c) tembaga.....	35
Gambar 4.2	Daerah pengujian planimetri dari foto struktur mikro spesimen <i>pulley</i> .	35
Gambar 4.3	Grafik hubungan antara media pendingin terhadap laju pendinginan	37
Gambar 4.4	Grafik hubungan antara laju pendinginan terhadap massa jenis.....	38
Gambar 4.5	Grafik hubungan antara laju pendinginan terhadap porositas.....	39
Gambar 4.6	Grafik hubungan antara laju pendinginan terhadap diameter butir rata-rata	40

DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul
Lampiran 1.	Dimensi Benda Kerja
Lampiran 2.	Data Hasil Pengujian Komposisi
Lampiran 3.	Perhitungan Nilai <i>Theoretical Density</i>
Lampiran 4.	Perhitungan Nilai Porositas
Lampiran 5.	Foto Mikrostruktur dan Perhitungan Diameter Butir Rata-Rata



RINGKASAN

Luqman Baihaqi, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Juni 2018, *Pengaruh Laju Pendinginan Terhadap Porositas dan Struktur Mikro Coran Pulley Al-Zn dengan Permanent Mold*, Dosen Pembimbing: Wahyono Suprpto dan Bayu Satriya Wardhana.

Penggunaan aluminium dalam industri manufaktur terus meningkat dikarenakan aluminium memiliki beberapa sifat yang menguntungkan diantaranya dapat didaur ulang, ringan, temperatur lelehnya rendah, daya hantar panas maupun listrik yang baik dan memiliki toleransi yang baik pula, sehingga memainkan peran yang penting dalam pemilihan material di industri manufaktur. Sifat aluminium sangat dipengaruhi komposisi paduan dan proses fabrikasinya. Proses manufaktur yang biasa digunakan untuk mengolah aluminium adalah dengan pengecoran logam. Pada pengecoran logam, cacat pada produk coran sangat mudah terjadi, salah satunya adalah porositas akibat dari kelarutan gas maupun akibat penyusutan. Cacat porositas akan mengakibatkan penurunan kualitas, dan analisis mikrostruktur dilakukan untuk mengetahui struktur logam dalam hal ini adalah diameter butir yang mempengaruhi sifat dan kualitas dari produk cor. Untuk meningkatkan kualitas produk coran, perencanaan terhadap proses solidifikasi logam memberikan timbal balik yang positif, hal ini akan dikontrol dengan melakukan laju pendinginan pada cetakan permanen.

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental nyata dan bertujuan untuk mengetahui pengaruh laju pendinginan cetakan terhadap porositas dan mikrostruktur produk coran *pulley* Al-Zn dengan memvariasikan laju pendinginan dengan media pendingin yang disisipkan dibagian alas cetakan dengan pasir, baja, dan tembaga, pada penuangan 700°C dan preheating cetakan 250°C . Pengambilan data porositas dilakukan menggunakan metode pengujian piknometri dengan tiga buah spesimen pada masing-masing variasi laju pendinginan. Sedangkan pada pengujian mikrostruktur yang diamati adalah diameter butir dari bagian alas produk *pulley* yang bersentuhan langsung dengan media pendingin menggunakan metode planimetri dengan bantuan foto hasil dari analisis menggunakan mikroskop logam dengan pembesaran 100x.

Dari hasil penelitian didapatkan bahwa laju pendinginan $0,673^{\circ}\text{C/s}$ (pasir) menghasilkan produk dengan porositas tertinggi 3,101% dan diameter butir rata-rata terbesar $88,08\mu\text{m}$. Berikutnya laju pendinginan $0,964^{\circ}\text{C/s}$ (baja) menghasilkan produk dengan porositas 2,899% dan diameter butir rata-rata $86,08\mu\text{m}$. Sedangkan laju pendinginan $1,169^{\circ}\text{C/s}$ (tembaga) menghasilkan produk dengan porositas terendah 1,499% dan diameter butir rata-rata terkecil $65,90\mu\text{m}$.

Kata kunci: pengecoran logam, aluminium, laju pendinginan, porositas, struktur mikro, diameter butir rata-rata.

SUMMARY

Luqman Baihaqi, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering Brawijaya University, June 2018, *Effect of Cooling Rate on Porosity and Microstructure of Al-Zn Pulley Castings with Permanent Mold*, Academic Supervisor: Wahyono Suprpto and Bayu Satriya Wardhana.

The use of aluminum in manufacturing continues to increase as aluminum has several beneficial properties including recyclable, lightweight, low melting temperature, good at thermal and electrical conductivity and have a good tolerance, so aluminum has an important role in material selection at the manufacturing industry. The properties of aluminum is strongly influenced by the alloy composition and its fabrication process. The usual manufacturing process used to process aluminum is by metal casting. In metal casting, defects of casting products are very easy to occur, one of which is porosity, a result of gas solubility or due to shrinkage. Porosity defects will decrease product quality, and microstructure analysis was performed to find out the metal structure, in this case the grain diameter that affect the properties and quality of the cast product. To improve the quality of the cast product, planning on the metal solidification process provides a positive feedback, it will be controlled by the rate of cooling the permanent molds.

This research used a true experimental research and was aimed to determine the effect of the cooling rate on the porosity and microstructure of Al-Zn pulley castings by varying the cooling rate with the cooling medium that inserted in the base of the permanent mold with sand, steel, and copper, with casting temperatre at 700°C and preheating temperature of mold at 250°C. Porosity data was collected using pycnometry method with three specimens at each cooling rate variation. While in microstructure testing, the observed parameter are the grain diameter of the base product in direct contact with the cooling medium using the planimetry method with the help of the photo results from the analysis using a metal microscope with 100x magnification..

The result showed that cooling rate 0,673°C/s (sand) produced products with the highest porosity 3,101% and the biggest average grain diameter 88,08µm. Cooling rate 0.964°C/s (steel) produced products with a porosity of 2.899% and an average grain diameter 86.08 µm. While, the cooling rate 1,169°C/s (copper) produced products with the lowest porosity 1,499% and the smallest average grain diameter 65,90µm.

Keywords: metal casting, aluminum, cooling rate, porosity, microstructure, average grain size.

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Melihat ke depan, permintaan aluminium diperkirakan meningkat karena penggunaan aluminium di berbagai industri manufaktur bertambah. Beberapa sifat aluminium yang menguntungkan antara lain dapat digunakan untuk berbagai aplikasi, dapat di daur ulang, ringan, temperatur lelehnya rendah, daya hantar panas maupun listrik yang baik dan toleransi yang tepat memainkan peran yang penting dalam pemilihan material sehingga konsumsi aluminium global juga akan terus meningkat (Grace Matthews Inc, 2014). Ingulstad, Storli, dan Gendron (2014) menyatakan bahwa antara tahun 1890 dan 2012, produksi bauksit dunia meningkat dari 22.000 ton menjadi 211 juta ton, begitu pula dengan pertumbuhan alumina dan produksi aluminium juga mengalami peningkatan yang hampir sama. Kebutuhan konsumsi aluminium di Indonesia pada tahun 2011 berada di kisaran 889.000 ton yang di *supply* oleh 40 perusahaan dalam negeri dan kekurangannya masih diimpor (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2012). Sifat aluminium sangat dipengaruhi oleh komposisi paduan dan proses fabrikasinya.

Proses manufaktur yang sering digunakan untuk mengolah aluminium menjadi produk jadi salah satunya adalah dengan proses pengecoran logam. Pengecoran logam merupakan proses manufaktur yang dilakukan dengan tahap melebur logam, menuangkan logam cair dan membiarkan tersolidifikasi dalam cetakan, lalu mengambil produk coran dari cetakan. Produk coran dikatakan memiliki kualitas yang baik apabila terdapat cacat seminimal mungkin, akurat dan presisi terhadap desain, permukaannya halus, dan memiliki sifat mekanik yang tinggi. Dalam usaha meningkatkan dan memperbaiki kualitas produk coran, perencanaan terhadap proses solidifikasi logam dapat memberikan timbal balik yang positif terhadap sifat dan kualitas produk coran. Pendinginan cepat pada logam akan menghasilkan produk yang kuat dan keras, sedangkan pendinginan yang lambat akan menghasilkan produk yang ulet. Dalam pengecoran logam, cacat porositas mengakibatkan penurunan kualitas, dan analisis terhadap struktur mikro dilakukan untuk mengetahui struktur dari logam yang mempengaruhi sifat dan kualitas dari produk coran.

Pengecoran logam dengan *permanent mold* mampu menghasilkan produk dengan kualitas yang baik karena memiliki toleransi dimensi tinggi, dan dapat menghasilkan produk dengan kekasaran permukaan yang rendah karena cetakan terbuat dari baja atau logam tertentu. Pengecoran dengan *permanent mold* dapat digunakan pada skala produksi massal sehingga memiliki keuntungan dalam menghemat waktu dan biaya produksi. Pada penelitian ini menggunakan Al-Zn sebagai bahan cor, dengan proses pengecoran menggunakan *permanent mold*, dan selanjutnya diteliti mengenai pengaruh laju pendinginan cetakan terhadap porositas dan struktur mikro yang terjadi pada produk coran.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang, rumusan masalah pada penelitian ini adalah bagaimana laju pendinginan mempengaruhi porositas dan struktur mikro pada produk coran yang juga berpengaruh terhadap kualitas dari produk coran.

1.3 Batasan Masalah

Agar pembahasan tidak melebar, maka perlu adanya batasan masalah pada penelitian ini, diantaranya adalah:

1. Pengujian porositas menggunakan perhitungan *theoretical density* dan *apparent density*.
2. Analisis diameter butir mikrostruktur produk coran dengan metode planimetri.
3. Temperatur dan kecepatan penuangan dianggap konstan.
4. *Preheating* cetakan dianggap sama pada semua bagian cetakan.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh laju pendinginan cetakan terhadap porositas dan struktur mikro pada produk coran, juga untuk mendapatkan produk coran dengan kualitas yang baik dengan metode yang sesuai sehingga didapatkan produk yang mampu bersaing dengan produk impor.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Menambah pengetahuan mengenai pengaruh laju pendinginan terhadap produk coran Al-Zn dengan cetakan permanen.
2. Sebagai referensi untuk menghasilkan produk coran dengan kualitas yang baik.
3. Dapat digunakan sebagai masukan untuk industri pengecoran logam.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Supriyanto (2009) dalam penelitiannya mengenai analisis hasil pengecoran aluminium dengan variasi pendingin berupa udara suhu kamar, air sumur, dan oli SAE 40 didapatkan hasil dari pengujian ketangguhan benda uji dengan pendinginan udara suhu kamar memiliki nilai ketangguhan yang paling baik. Sedangkan pada pengujian kekerasan benda uji dengan pendinginan air sumur mempunyai nilai kekerasan yang paling baik.

Raharjo, Abdillah, dan Wanto (2011) dalam penelitiannya yang berjudul “*Analisa Pengaruh Pengecoran Ulang Terhadap Sifat Mekanik Paduan Aluminium ADC 12*” didapatkan hasil penelitian yaitu material ADC 12 kekerasannya turun dari 95,4 HRB menjadi 71,8 HRB dan porositasnya meningkat dari 5,77% menjadi 34,97% saat di *remelting* dengan temperatur penuangan 700°C.

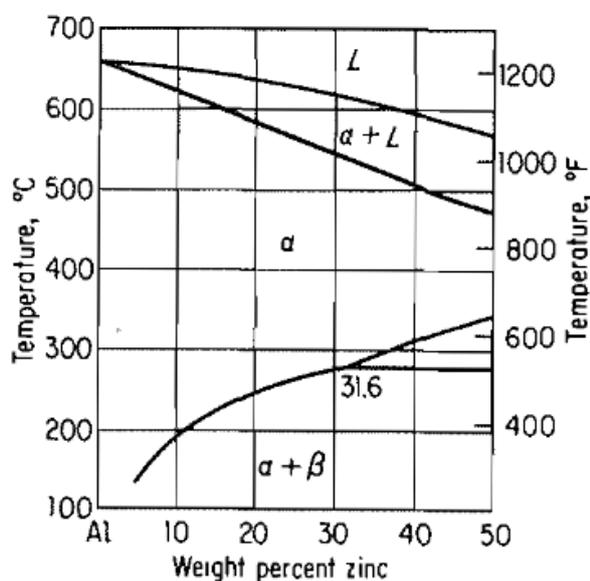
Nurkholiq, Purwanto, dan Respati (2013) dalam penelitiannya yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh tekanan terhadap struktur mikro, porositas, dan kekerasan pada pengecoran *squeeze* pada paduan aluminium daur ulang pada produksi kampas rem sepeda motor, dengan peleburan dan penuangan pada temperatur 700°C, *preheating* cetakan 400°C, dan variasi tekanan 125,71 MPa, 188,57 MPa dan 251,43 Mpa, didapatkan hasil bahwa semakin tinggi tekanan yang diberikan maka porositas akan menurun (porositas spesimen tekanan 125,71 MPa = 2,04%, tekanan 188,57 MPa = 1,50%, dan tekanan 251,43 MPa = 1,12%), nilai kekerasan meningkat (tekanan 125,71 MPa = 67,67 BHN, tekanan 188,57 MPa = 69,13 BHN dan tekanan 251,43 MPa = 79,87 BHN), dan struktur silikon semakin halus karena saat pembekuan terjadi proses penempaan.

Wijaya, Subaidi, dan Wijoyo (2017) dalam penelitiannya berjudul “*Pengaruh Temperatur Tuang Terhadap Ketangguhan Impak dan Struktur Mikro Hasil Pengecoran Paduan Aluminium dengan Menggunakan Cetakan Pasir*” dengan variasi temperatur tuang 660°C, 700°C dan 740°C, didapatkan hasil bahwa semakin tinggi temperatur tuang maka nilai ketangguhan impaknya semakin meningkat. Struktur mikro berupa *dendrite* yang terbentuk pada temperatur 660°C belum jelas, berukuran besar pendek, dan tidak teratur, pada temperatur 700°C *dendrite* semakin jelas, lengan-lengannya panjang, dan rapat, sedangkan pada temperatur 740°C *dendrite* sangat jelas, ukurannya lebih besar dan panjang.

2.2 Paduan Al-Zn

Aluminium murni pada dasarnya memiliki kekuatan yang cenderung rendah dan mudah terdeformasi, sehingga unsur-unsur paduan ditambahkan untuk mendapatkan sifat mekanik yang diinginkan. Namun, unsur-unsur paduan ini memiliki batas kadar penambahannya, karena jika terlalu banyak dikhawatirkan akan menghilangkan sifat-sifat utama dari aluminium sebagai logam utama. Unsur-unsur paduan yang dominan dalam hal ini adalah seng yang akan mempengaruhi sifat dari aluminium. Terdapat pula paduan lainnya dalam jumlah kecil yang juga mempengaruhi karakteristik dari paduan aluminium, unsur ini disebut unsur paduan minor.

Penambahan unsur seng sebagai paduan sebenarnya tidak memberikan pengaruh yang signifikan, namun dapat menghasilkan paduan yang *heat treatable*. Perlakuan panas dilakukan untuk menstabilkan *properties* yang dapat merubah beberapa komposisi didalamnya (Kaufman & Elwin, 2004). Penambahan unsur seng yang berlebih akan meningkatkan kegetasan, menurunkan ketangguhan dan ketahanan korosi. Penambahan unsur seng pada paduan Al-Si dapat meningkatkan ketangguhan.



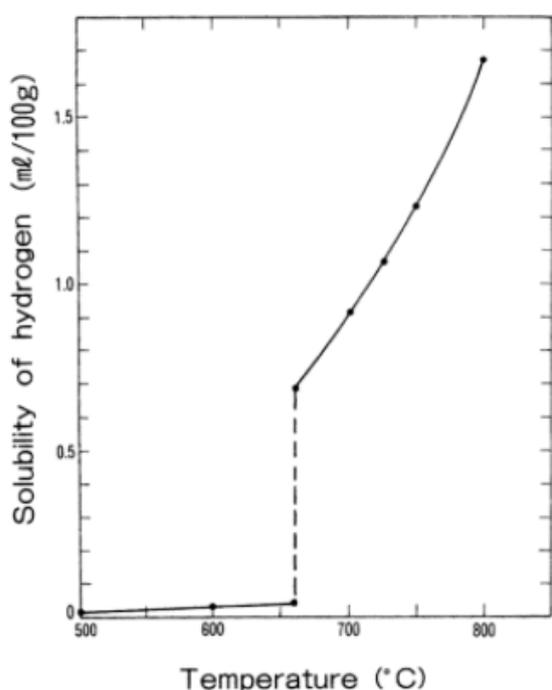
Gambar 2.1 Diagram fasa biner Al-Zn
Sumber: Avner (1974, p. 492)

2.3 Kelarutan Gas Dalam Paduan Al-Zn

Pada proses pengecoran logam, gas sangat mudah larut dalam logam cair. Unsur pembentuk gas seperti hidrogen memiliki kelarutan yang tinggi dalam logam cair daripada logam padat. Selama proses solidifikasi, hidrogen yang awalnya larut dalam fase cair menjadi tidak larut dalam fase padat, sehingga membentuk gelembung molekul gas H₂

yang lepas didalam fase padat, dan menyebabkan terjadinya porositas. Semakin banyak hidrogen yang larut dalam aluminium cair maka porositas yang terbentuk akan semakin banyak sehingga berpengaruh terhadap kualitas produk coran yang semakin menurun.

Porositas yang disebabkan oleh kelarutan gas hidrogen dipengaruhi oleh temperatur. Semakin tinggi temperatur, maka kelarutan hidrogen semakin besar. Saat cair, aluminium sangat mudah bereaksi dengan uap air (H_2O) yang terdapat di atmosfer sehingga terbentuk lapisan pasif Al_2O_3 dan gas hidrogen, dengan persamaan reaksi:



Gambar 2.2 Kelarutan hidrogen dalam aluminium
Sumber: Handbook of Aluminum Vol. 1 (2003, p.645)

Tabel 2.1
Kelarutan Hidrogen dalam Aluminium Cair

Temperatur		Kelarutan (dalam cm^2 hidrogen pada NTP per 100g Al)		
(°C)	(°F)	1	2	3
660	1220	0,69	0,83 (0,78 STP)	0,46
700	1290	0,91	1,07 (1,00 STP)	0,63
800	1470	1,68	1,86 (1,74 STP)	1,23
850	1560	2,18	2,40 (2,24 STP)	1,66

Sumber: Wahyono (2017, p.113)

Hidrogen masuk melalui atmosfer lingkungan yang lembab, pemakaian fluks yang tidak optimal, batu tahan api berpori, peralatan basah, atau bahan baku basah, kotor, dan berminyak. Pencegahan terbentuknya hidrogen dapat dilakukan dengan menghindari *over heating* cairan aluminium dengan menjaga suhu *holding*, menjaga aliran logam cair agar tidak turbulen saat penuangan, dan melakukan proses *degassing* dengan menginjeksikan gas *inert* seperti nitrogen atau argon ke dalam aluminium cair. Penambahan unsur paduan akan mempengaruhi kelarutan gas dalam aluminium.

2.4 Pengecoran Logam

Pengecoran logam merupakan proses manufaktur dengan tahap meleburkan logam, menuangkan logam cair ke dalam cetakan, membiarkan tersolidifikasi, lalu mengambil produk coran dari cetakan. Industri yang melakukan proses manufaktur pengecoran logam disebut *foundry*. Temperatur yang digunakan untuk melebur logam biasanya berada pada temperatur 50°C-100°C di atas titik lebur material yang dileburkan. Pengecoran logam berdasarkan cetakannya diklasifikasikan menjadi dua yaitu:

1. *Expendable mold* merupakan teknik pengecoran logam yang cetakannya hanya bisa digunakan untuk satu kali proses penuangan. Bahan cetakan umumnya adalah pasir, gips, keramik, dan material sejenis yang dicampur bahan pengikat. Pada cetakan, proses pengambilan produk cor harus merusak cetakannya. Contoh dari *expendable mold* adalah *sand casting* dan *investment casting*.
2. *Permanent Mold* merupakan teknik pengecoran logam yang cetakannya dapat digunakan berulang-ulang. Cetakan terbuat dari baja atau logam tahan panas. Cetakan ini dapat digunakan dalam produksi massal sehingga mengurangi biaya produksi, menghasilkan produk dengan dimensi yang baik, dan permukaan yang halus. Contoh dari *permanent mold* adalah *die casting*, *centrifugal casting*, dan *squeeze casting*.

Chill Casting adalah salah satu metode pengecoran logam, dimana *chill* merupakan objek yang digunakan untuk menyerap panas dan mempercepat proses solidifikasi pada bagian tertentu dari cetakan. Bagian cetakan yang biasa diberi *chill* adalah yang memiliki ketebalan paling besar, bertujuan agar logam cair dapat tersolidifikasi secara serempak. Metode ini juga mempengaruhi mikrostruktur dan sifat dari produk cor karena menyebabkan pembekuan terarah. *Chill* yang digunakan dapat terbuat dari logam seperti besi, baja, tembaga, perunggu, maupun aluminium. Material pasir dengan densitas, konduktivitas termal, dan kapasitas termal yang tinggi juga bisa digunakan, seperti pasir kromit atau pasir zirkon digunakan saat membuat cetakan dengan pasir silika. Terdapat 2 jenis *chill* yaitu:

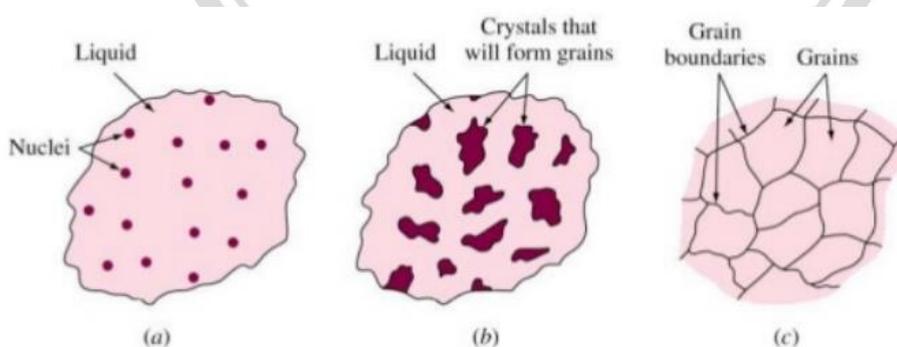
1. *Internal Chills* adalah potongan logam yang ditempatkan di dalam rongga cetakan. Ketika logam cair dituang, potongan logam ini akan meleleh dan menjadi bagian akhir dari produk cor, sehingga logam yang digunakan harus terbuat dari paduan yang sama atau sesuai dengan logam yang di cor.
2. *External Chills* adalah massa suatu material yang memiliki kapasitas panas dan konduktivitas termal yang tinggi. Massa ini ditempatkan di tepi rongga cetakan, dan secara efektif menjadi bagian dari dinding rongga cetakan.

2.5 Peleburan

Peleburan merupakan proses memanaskan logam hingga menjadi cair. Temperatur peleburan mengacu pada *melting point* logam yang dilebur apabila menggunakan logam murni, atau garis liquidus jika menggunakan logam paduan. Peleburan logam biasanya dilakukan pada temperatur 50°C - 100°C diatas *melting point* logam tersebut. Dalam menentukan temperatur cair pada logam paduan maka digunakan diagram fasa paduan tersebut, dimana kadar atau persentase masing-masing unsur paduan harus diketahui terlebih dahulu.

2.6 Solidifikasi

Solidifikasi merupakan proses transformasi logam/paduan dari fase cair menjadi padat. Solidifikasi diawali dengan pembentukan inti yang stabil. Kemudian logam cair perlahan berubah menjadi *solid*, dimulai dengan terbentuk kristal, lalu kristal tumbuh membentuk struktur butir dengan batas butir, hingga akhirnya menjadi padat. Garis awal terjadinya pembekuan disebut garis liquidus dan garis akhir pembekuan disebut garis solidus. Proses solidifikasi dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Proses solidifikasi
Sumber: Beeley (1972, p.883)

Daerah pembekuan pada proses solidifikasi logam terdiri dari 3 daerah/zona, yang dapat dilihat pada Gambar 2.4.

- *Chill Zone*

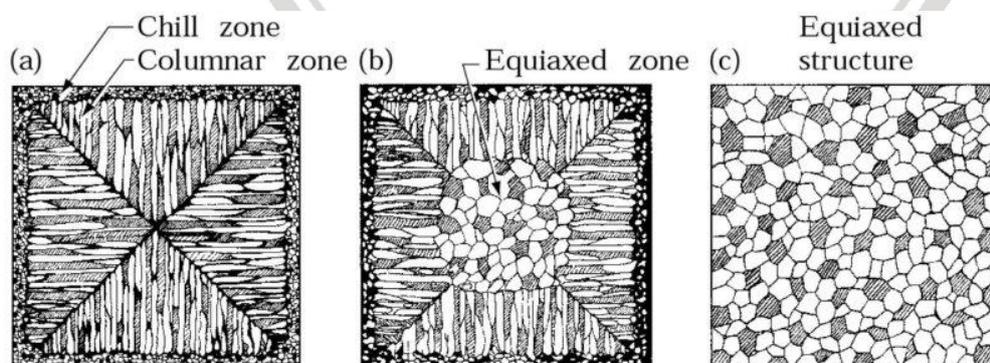
Saat proses penuangan berlangsung, logam cair yang bersentuhan langsung dengan dinding cetakan akan mengalami pendinginan cepat dibawah temperatur *liquid*-nya. Akibatnya, logam pada dinding cetakan memiliki banyak inti padat dan selanjutnya tumbuh kearah logam cair atau pusat rongga cetakan. Jika temperatur penuangan rendah maka seluruh logam cair akan membeku cepat dibawah temperatur *liquidus*-nya, dan jika temperatur penuangan tinggi, logam cair yang berada ditengah akan tetap berada diatas temperatur *liquidus* untuk waktu yang lebih lama.

- *Columnar Zone*

Sesaat setelah penuangan dilakukan, terjadi penurunan gradien temperatur pada dinding cetakan dan kristal pada daerah *chill* tumbuh memanjang. Kristal-kristal tersebut tumbuh memanjang berlawanan dengan arah perpindahan panas (panas bergerak dari logam cair ke arah dinding cetakan yang temperaturnya lebih rendah) yang disebut *dendrite*. Tiap kristal *dendrite* terdiri dari banyak logam dendrit (*primary dendrite*). Jika fraksi volume padatan (*dendrite*) meningkat dengan bertambahnya panjang dendrit dan jika struktur yang terbentuk berfase tunggal, maka lengan-lengan *dendrite* sekunder dan tertier akan keluar dari lengan *dendrite* primer. Daerah pembekuan yang terbentuk antara ujung *dendrite* dan titik dimana sisa cairan terakhir mengalami pembekuan disebut *mushy zone/pasty zone*.

- *Equiaxed Zone*

Terdiri dari butir-butir *equiaxial* yang tumbuh secara acak ditengah logam cair. Perbedaan temperatur pada daerah ini tidak menyebabkan butir tumbuh memanjang.



Gambar 2.4 Proses pembentukan butir pada cetakan
Sumber: Kalpakjian (2009, p.239)

2.7 Laju Pendinginan

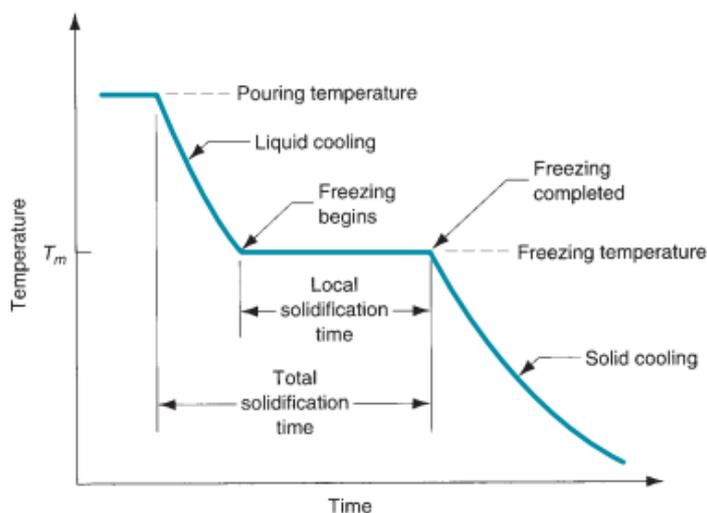
Laju pendinginan termasuk kedalam proses solidifikasi yang nilainya berbeda-beda tergantung pada materialnya. Laju pendinginan adalah penurunan temperatur tiap detiknya, dimana nilai temperaturnya dimulai saat temperatur penuangan material hingga temperatur pembekuan berakhir. Rumus laju pendinginan dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\dot{q} = \frac{\Delta T}{t} = \frac{T_{pouring} - T_{freezing}}{t} \dots \dots \dots (2-2)$$

Keterangan:

- \dot{q} = Laju pendinginan (°C/s)
- $T_{pouring}$ = Temperatur Penuangan (°C)
- $T_{freezing}$ = Temperatur pembekuan (°C)
- t = Waktu (s)

Logam mulai tersolidifikasi sesaat setelah temperaturnya turun dibawah titik leburnya. Dalam proses pendinginan dikenal waktu solidifikasi lokal, yang merupakan waktu yang dibutuhkan untuk logam untuk membeku dimana panas laten logam dilepaskan ke cetakan di sekitarnya. Sedangkan waktu solidifikasi total adalah waktu yang dibutuhkan mulai dari temperatur penuangan hingga temperatur pembekuan berakhir (laju pendinginan). Setelah logam menjadi *solid*, pendinginan berlanjut kembali dengan laju yang ditunjukkan oleh kemiringan kurva pendinginan pada gambar 2.5. Proses pendinginan dimulai dari logam cair yang bersentuhan langsung dengan dinding cetakan sehingga terbentuk kulit tipis padat sesaat setelah dilakukan penuangan. Ketebalan kulit meningkat disekitar logam cair sebagai pembekuan maju ke arah pusat rongga. Laju pendinginan dipengaruhi oleh perpindahan panas ke cetakan serta sifat termal dari logam (Groover, 2010).



Gambar 2.5 Kurva pendinginan pada logam dalam pengecoran
Sumber: Groover (2010, p.214)

2.8 Konduktivitas Termal

Konduktivitas termal berpengaruh besar terhadap laju pendinginan logam cair selama proses solidifikasi dan nilainya berbeda-beda tergantung pada materialnya. Konduksi adalah proses transfer panas dimana melibatkan transfer energi panas dalam material dari molekul ke molekul tanpa terjadinya perpindahan massa. Sehingga konduktivitas termal adalah kemampuan suatu material untuk mengalirkan/menghantarkan panas. Material dengan ikatan logam umumnya memiliki konduktivitas termal yang lebih tinggi daripada material dengan ikatan ion atau kovalen (keramik dan plastik). Material dengan konduktivitas listrik yang tinggi biasanya juga memiliki nilai konduktivitas termal yang tinggi.

Tabel 2.2
 Nilai Konduktivitas Termal Beberapa Material

Material	Konduktivitas Thermal (W/m.K)
Aluminium	211.0
Tembaga	385.0
Baja	45.0
Pasir (<i>saturated</i>)	2.4

Sumber: Aswata & Suarnadwipa (2016, p.2)

2.9 Massa Jenis

Massa jenis/densitas (ρ) termasuk ke dalam sifat fisik dari suatu material yang merupakan pengukuran massa per satuan volume benda dengan satuan yang umum adalah (g/cm^3). Massa jenis juga digunakan dalam perhitungan porositas. Terdapat dua massa jenis pada perhitungan porositas yaitu:

a. *Theoretical Density*

Massa jenis teoritis adalah massa jenis suatu material tanpa mempertimbangkan porositas di dalamnya, dihitung berdasarkan persentase unsur penyusunnya. Massa jenis ini dihitung menggunakan rumus ASTM D 2734-94 yaitu:

$$\rho_{th} = \frac{100}{\left(\frac{\%Al}{\rho_{Al}} + \frac{\%Zn}{\rho_{Zn}} + \frac{\%Si}{\rho_{Si}} + etc\right)} \dots\dots\dots (2-3)$$

Keterangan:

- ρ_{th} = *Theoretical Density* (g/cm^3)
- $\rho_{Al}, \rho_{Zn}, \rho_{Si}, etc$ = Densitas Unsur (g/cm^3)
- $\%Al, \%Zn, \%Si, etc$ = Persentase Berat Unsur (%)

b. *Apparent Density*

Apparent density adalah massa jenis material dengan memperhitungkan porositas di dalamnya. Massa jenis ini dihitung menggunakan rumus ASTM B311-93 yaitu:



$$\rho_s = \rho_w \left(\frac{W_s}{W_s - (W_{sb} - W_b)} \right) \dots \dots \dots (2-4)$$

Keterangan:

ρ_s = *Apparent Density* (g/cm³)

ρ_w = Densitas Air (g/cm³)

W_s = Berat sampel di udara (*dry weight*) (g)

W_{sb} = Berat apung sampel dan keranjang di dalam air (g)

W_b = Berat apung keranjang di dalam air (g)

2.10 Porositas

Porositas terjadi akibat terperangkapnya gas hidrogen dalam logam cair saat peleburan maupun penuangan, dan gas tersebut terjebak hingga logam memadat. Hidrogen adalah produk gas sampingan dari reaksi pembentukan lapisan Al₂O₃ pada permukaan aluminium cair dan larut pada aluminium saat berwujud cair. Porositas menurunkan sifat mekanik dan kesempurnaan geometri produk coran. Porositas ditandai dengan terbentuknya lubang-lubang pada bagian dalam produk coran. Cacat porositas terdiri dari 2 macam, yaitu:

a. *Interdendritic Shrinkage*

Cacat akibat penyusutan pori-pori kecil antar *dendrite*. Cacat ini disebut juga *microshrinkage* atau *shrinkage porosity* (porositas penyusutan) (Askeland, 2010). Porositas ini menghasilkan bentuk lubang yang tidak beraturan dan panjang.

b. *Gas Porosity*

Cacat akibat karena adanya kelebihan hidrogen yang tidak dapat masuk dalam struktur logam atau paduan kristal padat sehingga membentuk gelembung yang terperangkap dalam logam padat dan akhirnya menghasilkan porositas gas (Askeland, 2010). Porositas gas menghasilkan lubang-lubang bulat saat diuji metalografi.

Nilai porositas dihitung menggunakan persamaan berikut:

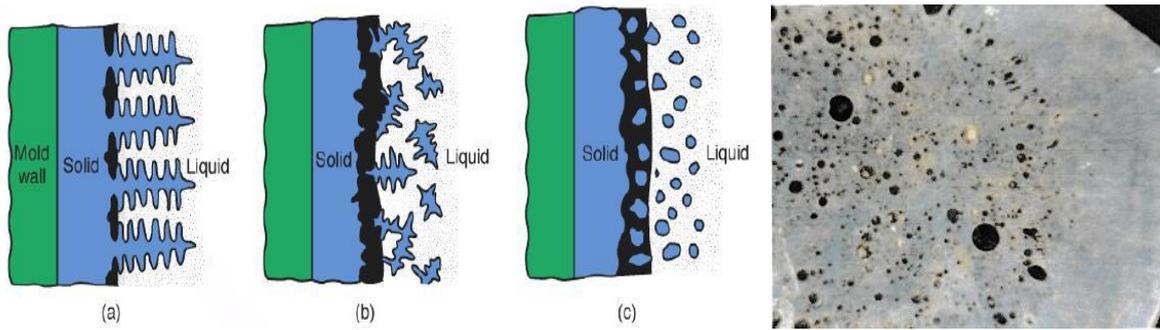
$$\% P = \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho_{th}} \right) \times 100\% \dots \dots \dots (2-5)$$

Keterangan:

%P = Persentase Porositas (%)

ρ_s = *Apparent Density* (gr/cm³)

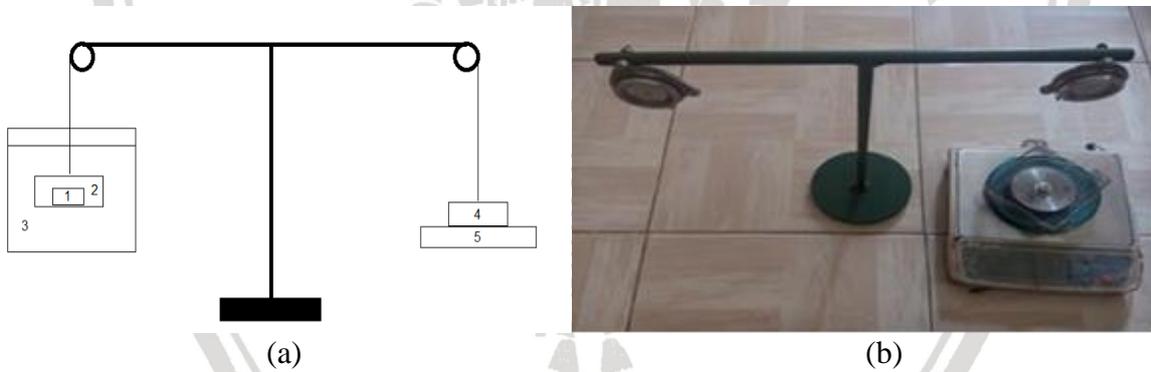
ρ_{th} = *Theoretical Density* (gr/cm³)



Gambar 2.6 Interdendritic shrinkage dan gas porosity
 Sumber: Askeland (2010)

2.11 Pikhometri

Pikhometri merupakan metode pengujian massa jenis dengan cara membandingkan massa spesimen di udara dengan massa spesimen di dalam air. Hasil dari pengujian pikhometri akan diolah dengan persamaan *apparent density*. Pengukuran dilakukan menggunakan timbangan yang disambungkan dengan keranjang agar mudah dalam menempatkan spesimen dan memanfaatkan bejana yang berisi air untuk mengetahui berat spesimen dan keranjang dalam air. Komponen-komponen pada pengujian pikhometri ini terdiri dari: 1. Spesimen 2. Keranjang 3. Bak berisi fluida 4. Master berat 5. Timbangan.



Gambar 2.7 Instalasi pengujian pikhometri (a) skema pengujian, (b) alat uji pikhometri
 Sumber: Laboratorium Material $\alpha\beta\gamma$ (2018)

2.12 Metalografi

Metalografi adalah ilmu yang mempelajari tentang metode pengujian atau pengamatan dengan tujuan mengetahui hubungan antara struktur dengan sifat yang dialami suatu logam atau paduan. Pengamatan struktur logam dilakukan dapat dengan menggunakan skala pembesaran rendah mikroskop optik maupun skala pembesaran tinggi dengan menggunakan atau mikroskop elektron. Tahapan dalam pengujian metalografi diantaranya:

1. *Cutting*
Merupakan proses pengambilan sebagian kecil sampel dari produk yang akan dianalisis. Pada proses pemotongan perlu diperhatikan alat potong yang akan digunakan agar tidak menimbulkan efek samping pada sampel.
2. *Labelling*
Merupakan pemberian identitas sampel dilakukan agar bagian-bagian dari sampel dapat dibedakan. Dalam hal ini harus dipastikan bahwa identitas tidak hilang selama proses pengujian.
3. *Mounting*
Merupakan proses pelapisan sampel logam dengan zat organik seperti bakelit, dan epoxy resin untuk mempermudah penanganan sampel saat proses pengujian metalografi berlangsung tanpa merusak sampel.
4. *Grinding*
Merupakan proses meratakan permukaan sampel dengan menggunakan bahan abrasif dari tingkat kasar sampai tingkat yang halus.
5. *Polishing*
Merupakan proses tahap akhir dari perataan permukaan sampel, dapat dilakukan dengan cara mekanis, kimia, dan elektrolitik dengan menggunakan pasta poles yang biasanya terbuat dari alumina hingga bebas goresan dan tampak seperti cermin.
6. *Etching*
Merupakan proses pemberian *reagent* kimia pada permukaan hasil *polishing* untuk mendapatkan penampakan khusus seperti fasa batas butir, dislokasi, dan struktur mikro tertentu dibawah mikroskop. Setiap logam memiliki *reagent etchant* tertentu. Pemilihan cairan etsa akan yang digunakan bergantung pada material yang akan diuji. Jenis-jenis cairan etsa dalam pengujian mikrostruktur dapat dilihat pada tabel 2.3.
7. *Cleaning*
Merupakan proses pembersihan permukaan logam setelah dietsa dari kotoran ataupun *reagent* kimia, dengan menggunakan air mengalir hingga tahap *polishing*, dan menggunakan alkohol untuk etsa.
8. *Drying*
Merupakan proses pengeringan permukaan sampel hingga kering. Air yang tersisa dapat memberikan interpretasi yang salah.
9. *Examination Under Microscope*

Tabel 2.3
Cairan Etsa dalam Pengujian Mikrostruktur

ETCHING REAGENT	COMPOSITION	USES	REMARKS
Nitric acid (nital)	White nitric acid (1-5 ml) Ethyl or methyl alcohol (95% or absolute) (100 ml) (also amyl alcohol)	In carbon steels: (1) to darken pearlite and give contrast between pearlite colonies, (2) to reveal ferrite boundaries, (3) to differentiate ferrite from martensite.	Etching rate is increased, selectivity decreased with increasing percentages of HNO ₃ . Reagent 2 (picric acid) usually superior Etching time a few seconds to 1 min
Picric acid (picral)	Picric acid (4 g) Ethyl or methyl alcohol (95% or absolute) (100 ml)	For all grades of carbon steels: annealed, normalized, quenched, and tempered, spheroidized, austempered. For all low-alloy steels attacked by this reagent	More dilute solutions occasionally useful. Does not reveal ferrite grain boundaries as readily as nital Etching time a few seconds to 1 min or more
Ferric chloride and hydrochloric acid	Ferric chloride (5 g) Hydrochloric acid (50 ml) Water (100 ml)	Structure of austenitic nickel and stainless steels	
Ammonium hydroxide and hydrogen peroxide	Ammonium hydroxide (5 parts) Water (5 parts) Hydrogen peroxide (2-5 parts)	Generally used for copper and many of its alloys	Peroxide content varies directly with copper content of alloy to be etched Immersion or swabbing for about 1 min. Fresh peroxide for good results
Ammonium persulfate	Ammonium persulfate (10 g) Water (90 ml)	Copper, brass, bronze, nickel, silver, aluminum bronze	Use either cold or boiling; immersion
Palmerton reagent	Chromic oxide (200 g) Sodium sulfate (15 g) Water (1000 ml)	General reagent for zinc and its alloys	Immersion with gentle agitation
Ammonium molybdate	Molybdic acid (85%) (100 g) Ammonium hydroxide (sp gr 0,9) (140 ml) Water (240 ml)	Rapid etch for lead and its alloys; very suitable for removing thick layer of worked metal	Alternately swab specimen and wash in running water

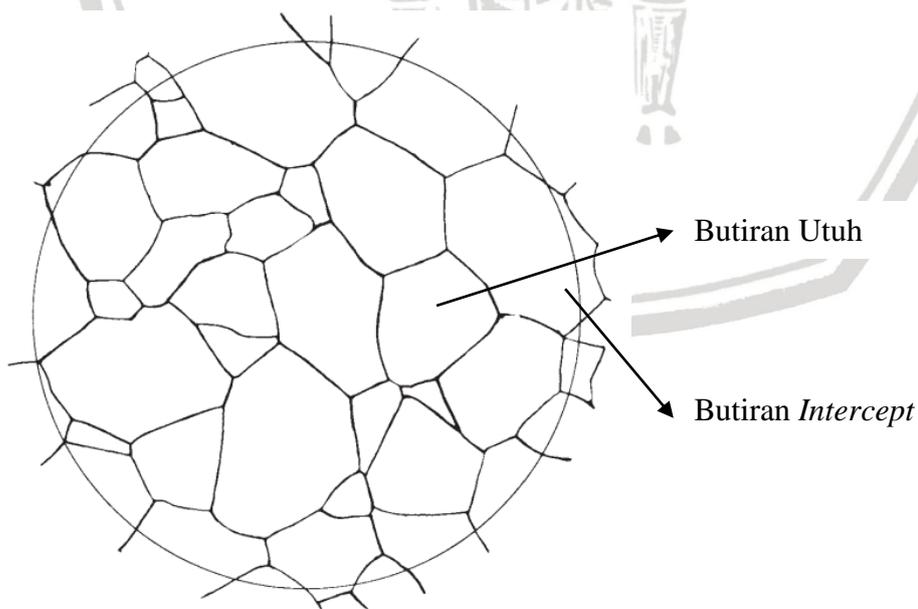
	Filter and add to nitric acid (sp gr 1,32) (60 ml)		
Hydrofluoric acid	Hydrofluoric acid (conc) (0,5 ml) H ₂ O (99,5 ml)	General microscopic for aluminum and its alloys	Swab with soft cotton for 15 s

Sumber: Avner (1974, p.22)

2.13 Perhitungan Diameter Butir (Planimetri)

Perhitungan diameter butir merupakan salah satu bentuk analisis mikrostruktur material. Diameter butir diketahui dari hubungan antara laju pertumbuhan butir (G) dan laju nukleasi (N) (Avner, 1974). Pengamatan struktur mikro dilakukan menggunakan mikroskop optik pada pembesaran tertentu setelah melalui beberapa tahap persiapan pengujian metalografi. Pengukuran diameter butir dilakukan pada foto mikrostruktur pembesaran 100X, mengacu pada standar ASTM E 112 dengan metode planimetri. Metode ini menggunakan lingkaran dengan luas 5000 mm² pada plastik transparan. Plastik ini diletakkan diatas foto mikro dan dihitung jumlah butir didalamnya. Perbesaran dipilih sedemikian sehingga setidaknya terdapat 50 butir dalam lingkaran. Berikutnya hitung jumlah semua butir dalam lingkaran, di tambah setengah dari jumlah butir yang berpotongan dengan lingkaran. Nilai butir ASTM dihitung dengan mengalikan jumlah butir dengan pengali jefferies (f), Berikut prosesnya:

1. Menghitung jumlah butiran di dalam lingkaran, baik yang utuh maupun yang *intercept*.



Gambar 2.8 Contoh Butiran

Sumber: ASTM E 112-96 (2004, p.5)

- Mencari nilai faktor pengali *Jeffries* sesuai dengan perbesaran yang digunakan.

Tabel 2.4

Hubungan Antara Perbesaran dengan Faktor Penggali *Jeffries* untuk Area 5000 mm²

Magnification Used, <i>M</i>	<i>Jeffries Multiplier, f, to Obtain Grains/mm²</i>
1	0.0002
10	0.02
25	0.125
50	0.5
75	1.125
100	2.0
150	4.5
200	8.0
250	12.5
300	18.0
500	50.0
750	112.5
1000	200.0

Sumber: ASTM E 112-96 (2004, p.8)

- Menghitung jumlah butir per satuan luas (N_A) menggunakan persamaan:

$$N_A = f \left(N_{inside} + \frac{N_{intercepted}}{2} \right) \dots \dots \dots (2-6)$$

Keterangan:

 N_A = Jumlah butiran per satuan luas (mm⁻²) f = Faktor pengali *Jeffries* ($M^2/5000$) N_{inside} = Jumlah butiran utuh di dalam area (mm⁻²) $N_{intercepted}$ = Jumlah butiran *intercept* di dalam area (mm⁻²) M = Perbesaran mikroskop yang digunakan

- Menghitung nilai ukuran butir (G) menggunakan persamaan ASTM E 112-96:

$$G = (3,321928 \log_{10} N_A) - 2,954$$

Keterangan:

 G = Nilai ukuran butir ASTM

- Mengubah nilai ukuran butir (G) menjadi nilai diameter butir rata-rata dengan menggunakan rumus interpolasi dari nilai yang sudah diketahui pada tabel 2.5.

Tabel 2.5
Grain Size Relationship

Grain Size No. G	\bar{N}_A Grains/Unit Area		\bar{A} Average Grain Area		\bar{d} Average Diameter		$\bar{\ell}$ Mean Intercept		\bar{N}_L No./mm
	No./in. ² at 100X	No./mm ² at 1X	mm ²	μm ²	mm	μm	mm	μm	
00	0.25	3.88	0.2581	258064	0.5080	508.0	0.4525	452.5	2.21
0	0.50	7.75	0.1290	129032	0.3592	359.2	0.3200	320.0	3.12
0.5	0.71	10.96	0.0912	91239	0.3021	302.1	0.2691	269.1	3.72
1.0	1.00	15.50	0.0645	64516	0.2540	254.0	0.2263	226.3	4.42
1.5	1.41	21.92	0.0456	45620	0.2136	213.6	0.1903	190.3	5.26
2.0	2.00	31.00	0.0323	32258	0.1796	179.6	0.1600	160.0	6.25
2.5	2.83	43.84	0.0228	22810	0.1510	151.0	0.1345	134.5	7.43
3.0	4.00	62.00	0.0161	16129	0.1270	127.0	0.1131	113.1	8.84
3.5	5.66	87.68	0.0114	11405	0.1068	106.8	0.0951	95.1	10.51
4.0	8.00	124.00	0.0081	8065	0.0898	89.9	0.0800	80.0	12.50
4.5	11.31	175.36	0.0057	5703	0.0755	75.5	0.0673	67.3	14.87
5.0	16.00	248.00	0.0040	4032	0.0635	63.5	0.0566	56.6	17.68
5.5	22.63	350.73	0.0029	2851	0.0534	53.4	0.0476	47.6	21.02
6.0	32.00	496.00	0.0020	2016	0.0449	44.9	0.0400	40.0	25.00
6.5	45.25	701.45	0.0014	1426	0.0378	37.8	0.0336	33.6	29.73
7.0	64.00	992.00	0.0010	1008	0.0318	31.8	0.0283	28.3	35.36
7.5	90.51	1402.90	0.0007	713	0.0267	26.7	0.0238	23.8	42.04
8.0	128.00	1984.00	0.0005	504	0.0225	22.5	0.0200	20.0	50.00
8.5	181.02	2805.80	0.0004	356	0.0189	18.9	0.0168	16.8	59.46
9.0	256.00	3968.00	0.0003	252	0.0159	15.9	0.0141	14.1	70.71
9.5	362.04	5611.60	0.0002	178	0.0133	13.3	0.0119	11.9	84.09
10.0	512.00	7936.00	0.0001	126	0.0112	11.2	0.0100	10.0	100.00
10.5	724.08	11223.20	0.0001	89.1	0.0094	9.4	0.0084	8.4	118.90
11.0	1024.00	15872.00	0.0001	63.0	0.0079	7.9	0.0071	7.1	141.40
11.5	1448.15	22446.40	0.0000	44.6	0.0067	6.7	0.0060	6.0	168.20
12.0	2048.00	31744.10	0.0000	31.5	0.0056	5.6	0.0050	5.0	200.00
12.5	2896.31	44892.90	0.0000	22.3	0.0047	4.7	0.0042	4.2	237.80
13.0	4096.00	63488.10	0.0000	15.8	0.0040	4.0	0.0035	3.5	282.80
13.5	5792.62	89785.80	0.0000	11.1	0.0033	3.3	0.0030	3.0	336.40
14.0	8192.00	126976.30	0.0000	7.9	0.0028	2.8	0.0025	2.5	400.00

Sumber: ASTM E 112-96 (2004, p.8)

2.14 Hipotesis

Berdasarkan tinjauan pustaka maka dapat diambil hipotesis bahwa laju pendinginan akan mempengaruhi porositas dan struktur mikro dalam produk coran. Semakin cepat laju pendinginan maka porositas *shrinkage* (penyusutan) yang dihasilkan akan semakin kecil, akan tetapi porositas gas akibat gas hidrogen yang terjebak akan semakin besar. Sedangkan pada struktur mikro, semakin cepat laju pendinginan maka akan menghasilkan diameter butir dengan ukuran yang semakin kecil.



BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Jenis Penelitian

Jenis penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah penelitian eksperimental nyata (*true experimental research*), yaitu melakukan pengujian dan pengamatan secara langsung untuk mengetahui pengaruh laju pendinginan cetakan terhadap porositas dan struktur mikro pada coran *pulley* aluminium paduan dengan *permanent mold*. Selain itu, kajian pustaka dari berbagai sumber seperti buku, jurnal, dan skripsi juga diterapkan guna menambah informasi dan pengetahuan yang dirasa perlu.

3.2 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada tanggal 19 April – 20 Mei 2018. Tempat yang digunakan selama penelitian berlangsung diantaranya adalah:

1. Laboratorium Material $\alpha\beta\gamma$ Landungsari Malang, untuk proses pengecoran logam, *finishing* benda kerja *pulley*, dan pengujian piknometri.
2. Laboratorium Proses Produksi I, untuk proses pemotongan spesimen uji mikrostruktur.
3. Laboratorium Metalurgi Fisik, untuk pengujian mikrostruktur.

3.3 Variabel Penelitian

3.3.1 Variabel Bebas

Variabel bebas atau independen adalah variabel yang nilainya mempengaruhi variabel terikat dan ditentukan sebelum penelitian dilakukan. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah laju pendinginan cetakan lambat dengan media pendingin pasir, laju pendinginan cetakan sedang dengan media pendingin baja, dan laju pendinginan cetakan cepat dengan media pendingin tembaga. Media pendingin ini disisipkan dibagian alas cetakan.

3.3.2 Variabel Terikat

Variabel terikat atau dependen merupakan variabel yang nilainya dipengaruhi variabel bebas. Variabel terikat penelitian ini adalah nilai porositas dan struktur mikro (diameter butir) pada produk coran.

3.3.3 Variabel Terkontrol

Variabel terkontrol merupakan variabel yang nilainya dibuat sama atau konstan pada setiap percobaan. Variabel terkontrol pada penelitian ini adalah

1. Aluminium paduan (Al-Zn) sebagai bahan cor.
2. Menggunakan cetakan permanen dengan bentuk rongga *pulley* dengan bibir 4 mm.
3. Temperatur penuangan pada suhu 700°C.
4. *Preheating* cetakan pada temperatur 250°C.

3.4 Alat dan Bahan

3.4.1 Alat

1. Tungku Peleburan

Nama alat : Tungku Peleburan I 703

Spesifikasi : Kapasitas : ± 2 Kg

Tegangan : 220 V



Gambar 3.1 Tungku peleburan

2. Cetakan Permanen

Material Cetakan: Baja

Dimensi : (Terlampir)



Gambar 3.2 Cetakan permanen

3. *Thermogun Type* TM 969

- Spesifikasi :
- Power supply* : Baterai DC 1.5 V
 - Dimensi* : 203 x 197 x 47 m
 - Temperature Range* : Tipe K (-50°C – 1300 °C)



Gambar 3.3 Thermogun type TM 969

4. Kamera SLR



Gambar 3.4 Kamera SLR



5. Jangka Sorong Digital



Gambar 3.5 Jangka sorong digital

6. Thermocouple Type K



Gambar 3.6 Thermocouple type K

7. Data Logger



Gambar 3.7 Data logger

8. Timbangan Elektrik

Spesifikasi : Merk AND type EK-300i

Dimesi : 20 cm x 19 cm x 4 cm



Gambar 3.8 Timbangan elektrik

9. Amplas

Tipe : P 100, P 200, P 500, P 800, CC 1000, dan CW 2000.

Ukuran : 20 x 15 cm



Gambar 3.9 Kertas amplas

10. Kain Flanel



Gambar 3.10 Kain flanel

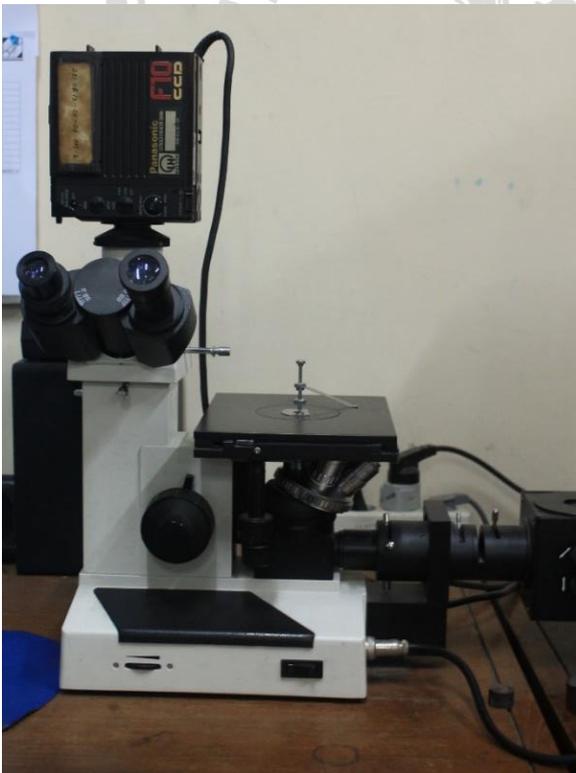
11. Alat Uji Piknometri



Gambar 3.11 Alat uji piknometri

12. Alat Uji Mikrostruktur

Merk : Olympus
Buatan : Jerman
Pembesaran : 10x, 50x, 100x, 200x



Gambar 3.12 Alat uji mikrostruktur

3.4.2 Bahan

1. Aluminium Ingot Al-Zn



Gambar 3.13 Aluminium ingot Al-Zn

2. Metal Polish



Gambar 3.14 Metal polish

3. Cairan Etsa HF 0,5% dan Alkohol



Gambar 3.15 Cairan Etsa

3.5 Prosedur Penelitian

3.5.1 Prosedur Pengecoran Logam

Adapun prosedur pengecoran untuk pengambilan data penelitian sebagai berikut:

1. Siapkan alat dan bahan yang akan digunakan dalam proses penelitian.
2. Menimbang dan memasukkan ingot aluminium paduan ke dalam mangkok peleburan.
3. Leburkan aluminium paduan di dalam tungku pengecoran dengan suhu 700°C.
4. Siapkan cetakan permanen dengan variasi alas dari material pasir, baja, dan tembaga.
5. Lakukan proses *preheating* cetakan permanen dengan suhu 250°C.
6. Bersihkan terak-terak pada permukaan logam cair sebelum mengambil logam cair.
7. Ambil logam cair dari tungku peleburan dengan ladle lalu lakukan proses pengecoran dengan menuangkan logam cair ke dalam rongga cetakan.
8. Jaga kecepatan penuangan, gunakan *stopwatch* untuk mencatat lama waktu penuangan.
9. Catat lama waktu pendinginan logam dengan *stopwatch*.
10. Lakukan analisis terhadap produk coran.

3.5.2 Prosedur Pengujian Porositas

1. Lakukan uji komposisi untuk mendapatkan persentase komposisi dalam produk coran.
2. Hitung nilai *theoretical density* dengan rumus standar ASTM E252-84 persamaan (2-3).
3. Siapkan produk coran, timbangan dan keranjang sebagai instalasi pengujian piknometri.
4. Timbang berat produk coran diudara (W_s).
5. Timbang berat keranjang didalam air (W_b).
6. Timbang berat keranjang dan produk coran didalam air (W_{sb}).
7. Hitung nilai *apparent density* dengan rumus standar ASTM B311-93 persamaan (2-4).
8. Hitung persentase porositas pada produk coran dengan rumus persamaan (2-5)

3.5.3 Prosedur Pengujian Struktur Mikro

1. Potong produk coran menjadi beberapa bagian kecil sampel dengan alat potong.
2. Berikan label/identitas pada sampel-sampel yang sudah dipotong.
3. Lakukan proses *mounting* pada sampel dengan menggunakan epoxy resin.
4. Haluskan permukaan sampel dengan kertas amplas dari tingkat yang kasar hingga halus.
5. Poles permukaan sampel menggunakan *metal polish* dan dengan bantuan kain flanel hingga permukaan sampel mengkilap seperti cermin.
6. Bersihkan permukaan sampel dengan alkohol, lalu tetesi sampel dengan cairan etsa.
7. Keringkan sampel yang sudah diberi etsa, gunakan *dryer* jika diperlukan.

8. Letakkan sampel dibawah mikroskop logam lalu atur fokus pada pembesaran 400 kali.
9. Lakukan pemotretan dengan kamera, lalu cetak hasil foto mikrostrukturnya.
10. Analisis foto mikrostruktur yang telah diambil yaitu perbedaan diameter butiran dengan menggunakan metode planimetri.

3.6 Skema Penelitian

Berikut adalah skema proses penelitian yang akan dilakukan pada penelitian ini:



Gambar 3.16 Skema Penelitian

3.7 Dimensi Benda Kerja

(Terlampir)

3.8 Rancangan Tabel dan Grafik Penelitian

3.8.1 Rancangan Tabel Penelitian

Tabel 3.1
Rancangan Data Hasil *Apparent Density*

Material Core	Ws (g)	Wb (g)	Wsb (g)	Berat Master (g)	(Wsb-Wb) (g)	Ws-(Wsb-Wb) (g)	ps (g/cm ³)	ps rata-rata (g/cm ³)
Pasir	WsP1	WbP1	WsbP1		P1	WP1	psP1	psP
	WsP2	WbP2	WsbP2		P2	WP2	psP2	
	WsP3	WbP3	WsbP3		P3	WP3	psP3	
Baja	WsB1	WbB1	WsbB1		B1	WB1	psB1	psB
	WsB2	WbB2	WsbB2	BM	B2	WB2	psB2	
	WsB3	WbB3	WsbB3		B3	WB3	psB3	
Tembaga	WsT1	WbT1	WsbT1		T1	WT1	psT1	psT
	WsT2	WbT2	WsbT2		T2	WT2	psT2	
	WsT3	WbT3	WsbT3		T3	WT3	psT3	

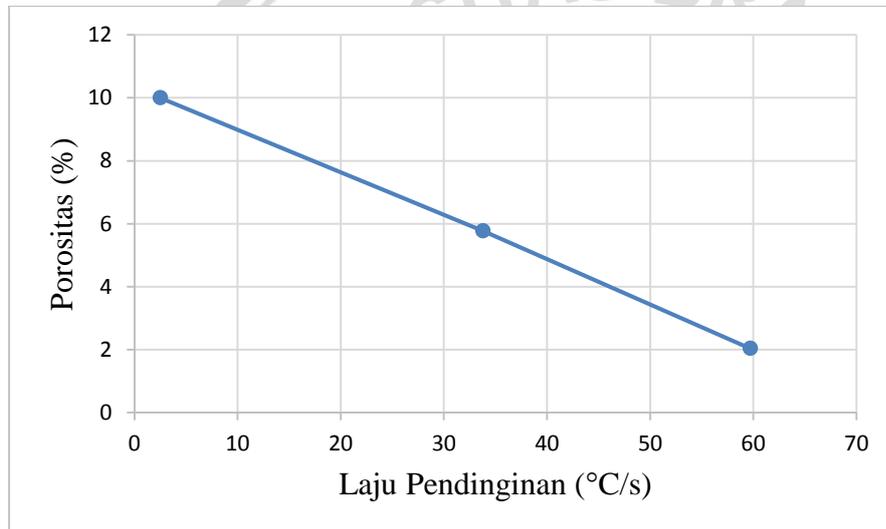
Tabel 3.2
Rancangan Data Hasil Perhitungan Porositas

Laju Pendinginan ($^{\circ}\text{C/s}$)	ρ_s rata-rata (g/cm^3)	ρ_{th} (g/cm^3)	Porositas (%)
LP	ρ_{sP}		PP
LB	ρ_{sB}	ρ_{th} produk	PB
LT	ρ_{sT}		PT

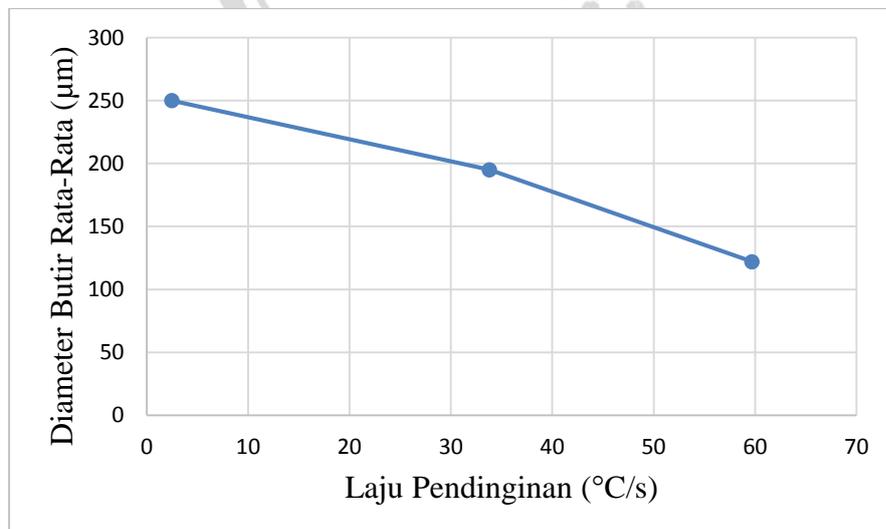
Tabel 3.3
Rancangan Data Hasil Laju Pendinginan

Media Pendingin	Laju Pendinginan ($^{\circ}\text{C/s}$)
Pasir	LP
Baja	LB
Tembaga	LT

3.8.2 Rancangan Grafik Penelitian (diestimasi)

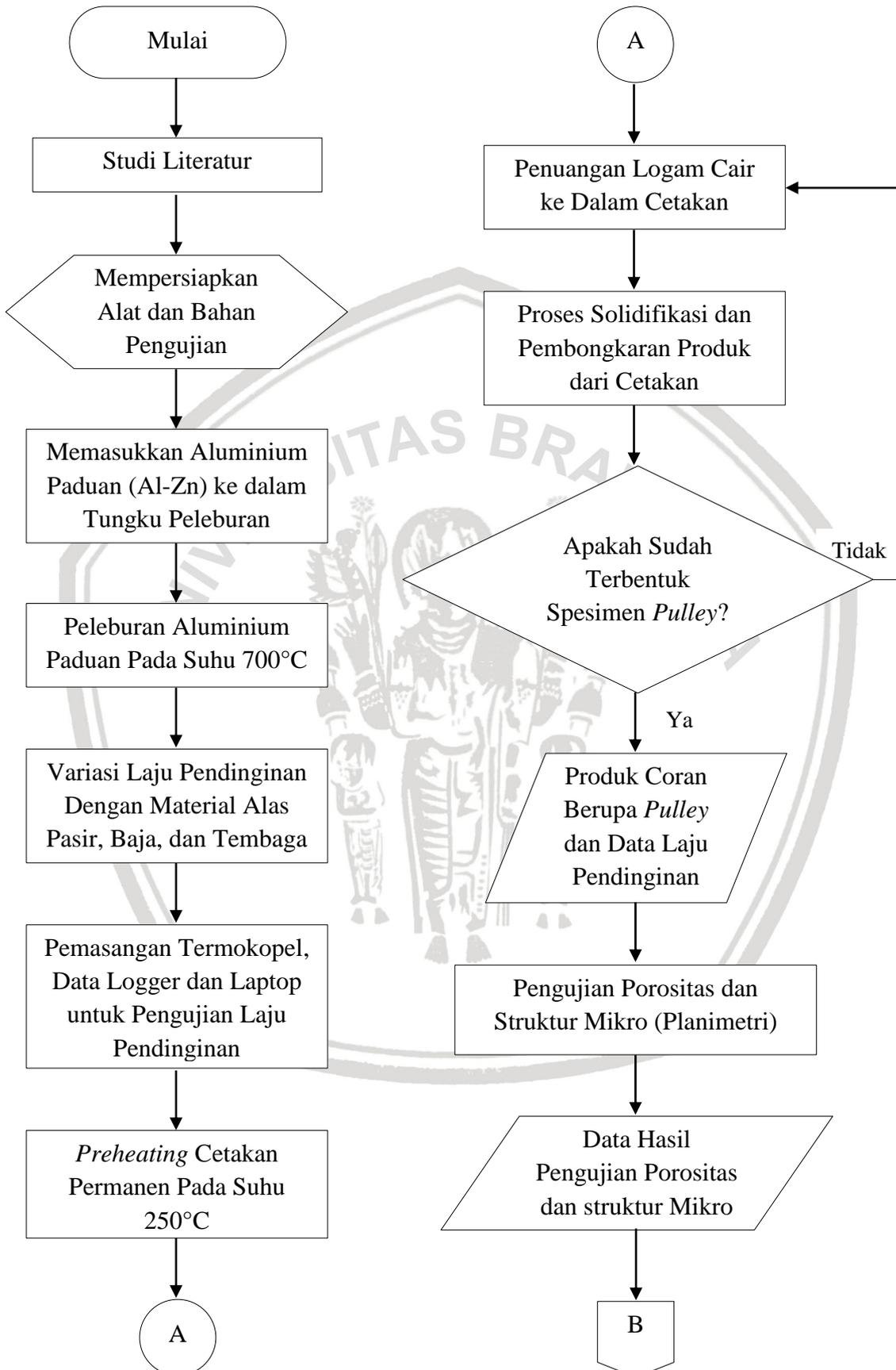


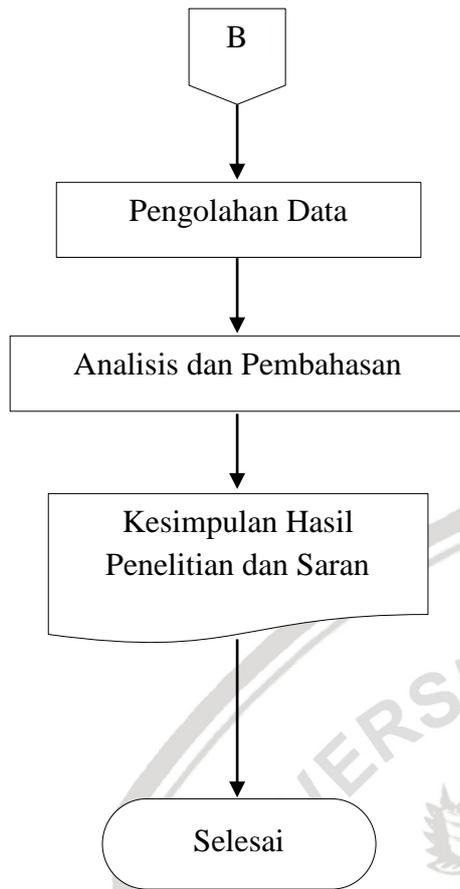
Gambar 3.17 Grafik hubungan antara laju pendinginan terhadap porositas



Gambar 3.18 Grafik hubungan antara laju pendinginan terhadap diameter butir rata-rata

3.9 Diagram Alir Penelitian





BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Penelitian

4.1.1 Data Hasil Pengujian Laju Pendinginan

Pengujian laju pendinginan dilakukan untuk mengetahui berapa penurunan temperatur tiap detiknya dari tiap variasi media pendingin, dimana nilai laju pendinginan dimulai saat temperatur penuangan logam cair ke dalam cetakan hingga temperatur pembekuan logam berakhir. Pengujian ini dilakukan dengan bantuan termokopel tipe K yang ditempatkan di bagian alas dalam cetakan permanen selama proses pengecoran dan disambungkan dengan *data logger* yang hasilnya akan diamati dan diolah melalui laptop dengan bantuan *software*.

Dalam penelitian ini proses untuk mendapatkan nilai laju pendinginan diawali dengan tahap penempatan termokopel di bagian alas cetakan dengan diikat menggunakan kawat. Kemudian ujung termokopel lainnya disambungkan dengan *data logger* dan disambungkan lagi dengan laptop yang sudah dilengkapi *software* untuk mengamati dan mengolah hasil dari *data logger*. Berikutnya dilakukan *preheating* cetakan pada temperatur 250°C, kemudian logam cair dituang ke dalam cetakan. Selama pengecoran berlangsung dari proses penuangan hingga produk coran seutuhnya berubah fase menjadi padat, *data logger* akan terus bekerja dan hasil berupa penurunan suhu tiap detiknya akan terbaca dalam bentuk data yang akan diolah dengan microsoft excel. Nilai laju pendinginan dihitung menggunakan rumus persamaan 2-2. Nilai temperatur pembekuan akhir diindikasikan dengan adanya temperatur yang sama dalam beberapa sekon secara berulang. Tabel 4.1 menunjukkan hasil dari pengujian laju pendinginan.

Tabel 4.1
Data Hasil Laju Pendinginan

Media Pendingin	Laju Pendinginan (°C/s)
Pasir	0,67
Baja	0,96
Tembaga	1,17

4.1.2 Data Hasil Pengujian Pikhometri

Proses pengujian piknometri dilakukan dengan membandingkan berat spesimen di udara dan berat spesimen di dalam air. Dengan pengujian ini akan dihasilkan nilai *apparent*

density. *Apparent density* adalah massa jenis material dengan memperhitungkan porositas di dalam material. Massa jenis ini dihitung menggunakan rumus standar ASTM B311-93 pada persamaan (2-4). Tabel 4.2 merupakan hasil dari pengujian piknometri yang dilakukan dengan coran *pulley* sebanyak 9 spesimen, dengan masing-masing 3 spesimen untuk setiap variasi laju pendinginan cetakan dengan material pendingin, dan di ambil nilai rata-ratanya.

Tabel 4.2
Data Hasil Pengujian Piknometri (*Apparent Density*)

Laju Pendinginan (°C/s)	Ws (g)	Wb (g)	Wsb (g)	(Wsb-Wb) (g)	Ws-(Wsb-Wb) (g)	ρs (g/cm ³)	ρs rata-rata (g/cm ³)
0,67 (pasir)	318,47	12,5	219,21	206,71	111,76	2,85	2,85
	257,86	12,5	179,32	166,82	91,04	2,83	
	211,19	12,5	150,41	137,91	73,28	2,88	
0,96 (baja)	301,55	12,5	207,13	194,63	106,92	2,82	2,86
	302,53	12,5	210,68	198,18	104,35	2,90	
	302,86	12,5	209,55	197,05	105,81	2,86	
1,17 (tembaga)	295,44	12,5	206,61	194,11	101,33	2,92	2,90
	298,28	12,5	208,38	195,88	102,40	2,91	
	308,56	12,5	213,81	201,31	107,25	2,88	

Contoh perhitungan *apparent density*:

$$\rho_s = \rho_w \left(\frac{W_s}{W_s - (W_{sb} - W_b)} \right)$$

$$\rho_s = 1 \left(\frac{318,47}{318,47 - (219,21 - 12,5)} \right)$$

$$\rho_s = 2,85 \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

Keterangan :

$$\rho_s = \text{Apparent Density (g/cm}^3\text{)}$$

$$\rho_w = \text{Densitas Air (g/cm}^3\text{)}$$

$$W_s = \text{Berat sampel di udara (dry weight) (g)}$$

$$W_{sb} = \text{Berat apung sampel dan keranjang di dalam air (g)}$$

$$W_b = \text{Berat apung keranjang di dalam air (g)}$$

4.1.3 Data Hasil Pegujian Komposisi

Proses pengujian komposisi dilakukan untuk mendapatkan nilai *theoretical density* dimana nilainya bergantung pada persentase dan massa jenis unsur-unsur kimia penyusun yang terdapat didalam spesimen. *Theoretical density* adalah massa jenis suatu material tanpa

mempertimbangkan porositas didalamnya. Massa jenis ini dihitung menggunakan rumus standar ASTM E252-84 pada persamaan (2-3). Tabel 4.3 merupakan hasil dari pengujian komposisi yang dilakukan dengan spesimen berbentuk ingot.

Tabel 4.3
Data Hasil Pengujian Komposisi (*Theoretical Density*)

Unsur	ρ Unsur (g/cm ³)	Persentase Berat Unsur (%)	Persentase / ρ Unsur
<i>Silicon</i> (Si)	2,33	6,71	2,880
<i>Iron</i> (Fe)	7,87	0,674	0,086
<i>Copper</i> (Cu)	8,94	1,01	0,113
<i>Manganese</i> (Mn)	7,44	0,101	0,014
<i>Magnesium</i> (Mg)	1,74	0,742	0,426
<i>Chromium</i> (Cr)	7,19	0,0362	0,005
<i>Zinc</i> (Zn)	7,13	13,32	1,868
<i>Titanium</i> (Ti)	4,51	0,032	0,007
<i>Sodium</i> (Na)	0,971	0,00018	0,000
<i>Calcium</i> (Ca)	1,54	0,00025	0,000
<i>Nickel</i> (Ni)	8,9	0,479	0,054
<i>Lead</i> (Pb)	11,35	0,012	0,001
<i>Phosphorus</i> (P)	1,82	0,0005	0,000
<i>Tin</i> (Sn)	7,27	0,0121	0,002
<i>Antimony</i> (Sb)	6,69	0,0061	0,001
<i>Strontium</i> (Sr)	2,63	0,0001	0,000
<i>Beryllium</i> (Be)	1,85	0,00006	0,000
<i>Zirconium</i> (Zr)	6,51	0,0028	0,000
<i>Bismuth</i> (Bi)	9,8	0,0003	0,000
<i>Cadmium</i> (Cd)	8,65	0,0026	0,000
<i>Aluminum</i> (Al)	2,7	76,9	28,481
Σ		100,04119	33,939
ρ_{th}			2,95

Contoh perhitungan *theoretical density*:

$$\rho_{th} = \frac{100}{\left(\frac{\%Al}{\rho_{Al}} + \frac{\%Zn}{\rho_{Zn}} + \frac{\%Si}{\rho_{Si}} + etc\right)}$$

$$\rho_{th} = \frac{100}{33,939}$$

$$\rho_{th} = 2,95 \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

Keterangan:

ρ_{th} = *Theoretical Density* (g/cm³)

$\rho_{Al}, \rho_{Zn}, \rho_{Si}, etc$ = Densitas Unsur (g/cm³)

$\%Al, \%Zn, \%Si, etc$ = Persentase Berat Unsur (%)

4.1.4 Data Hasil Perhitungan Porositas

Untuk mengetahui nilai produk coran dilakukan perhitungan dengan membandingkan nilai *apparent density* dengan *theoretical density* sesuai dengan persamaan (2-6). Tabel 4.4 merupakan data hasil perhitungan porositas pada spesimen produk coran *pulley*.

Tabel 4.4
Data Hasil Perhitungan Porositas

Laju Pendinginan (°C/s)	ρ_s rata-rata (g/cm ³)	ρ_{th} (g/cm ³)	Porositas (%)
0,67 (pasir)	2,85		3,23
0,96 (baja)	2,86	2,95	3,03
1,17 (tembaga)	2,90		1,63

Contoh perhitungan porositas:

$$\%P = \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho_{th}}\right) \times 100\%$$

$$\%P = \left(1 - \frac{2,85}{2,95}\right) \times 100\%$$

$$\%P = 3,23 \%$$

Keterangan:

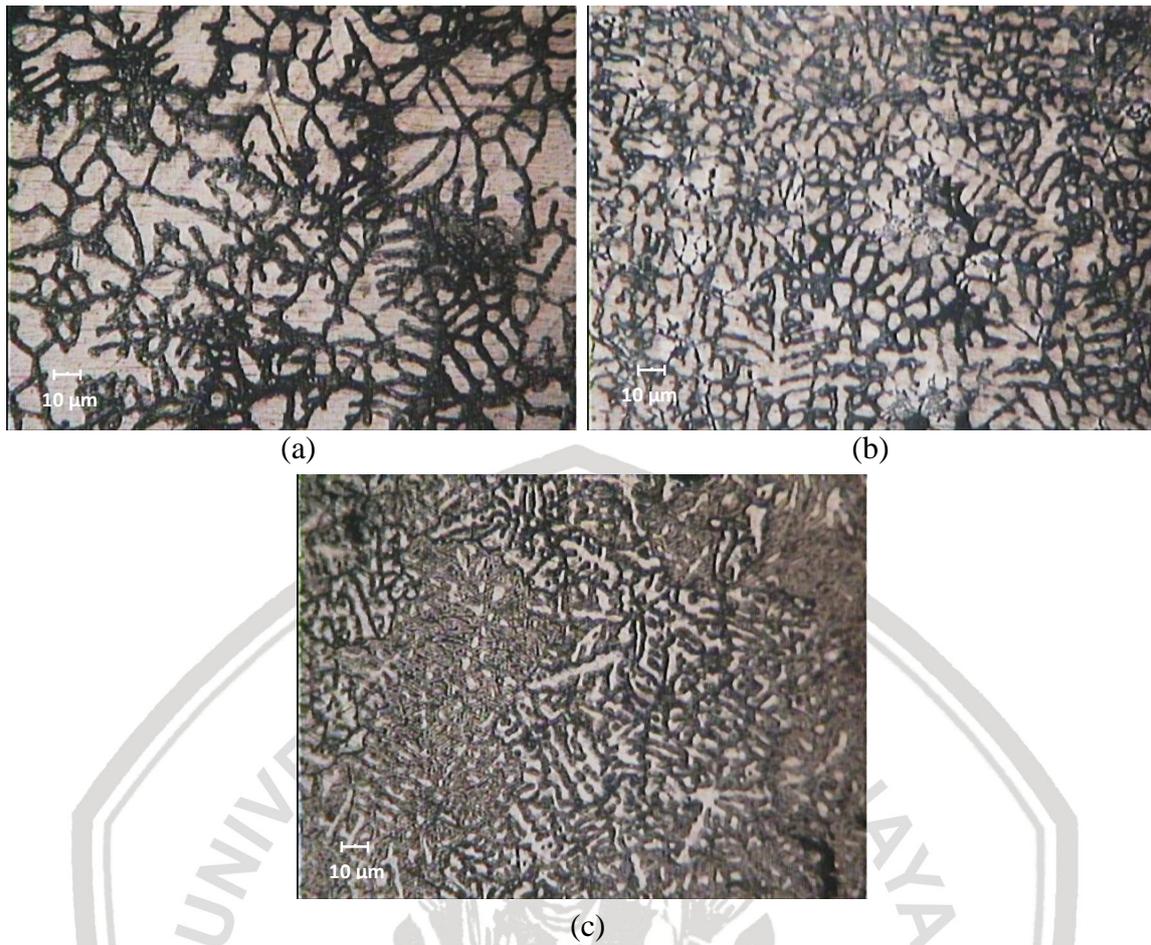
$\%P$ = Persentase Porositas (%)

ρ_s = *Apparent Density* (gr/cm³)

ρ_{th} = *Theoretical Density* (gr/cm³)

4.1.5 Data Hasil Pengujian Struktur Mikro

Pengujian terhadap struktur mikro dilakukan dengan metode planimetri menggunakan foto struktur mikro hasil dari pengamatan dibawah mikroskop logam dengan pembesaran 100x setelah sampel di etsa menggunakan 0,5% HF, hal ini dilakukan untuk mengetahui diameter butir rata-rata pada spesimen *pulley* Al-Zn. Sampel yang diambil untuk pengamatan struktur mikro menggunakan bagian permukaan bawah *pulley* (alas) yang mengalami proses solidifikasi cepat karena bersentuhan langsung dengan media pendingin (material penyerap panas). Berikutnya lingkaran dengan luas 5000 mm², diletakkan diatas foto struktur mikro, kemudian hitung jumlah butir dalam lingkaran dan tambah setengah dari jumlah butir yang berpotongan dengan lingkaran. Nilai ukuran butir ASTM dihitung dengan mengalikan jumlah butir dengan pengali *jefferies* (f). Berikutnya nilai ukuran butir ASTM akan dikonversi menjadi nilai diameter butir rata-rata dalam satuan mikron dengan rumus interpolasi. Foto struktur mikro dapat dilihat pada gambar 4.1.



Gambar 4.1 Mikrostruktur coran dengan media pendingin (a) pasir, (b) baja, (c) tembaga

4.1.5.1 Perhitungan Ukuran Butir ASTM



Gambar 4.2 Daerah pengujian planimetri dari foto struktur mikro spesimen *pulley*

Contoh perhitungan ukuran butir ASTM:

$$N_A = f \left(N_{inside} + \frac{N_{intercepted}}{2} \right)$$

$$N_A = 2,0 \left(56 + \frac{17}{2} \right)$$

$$N_A = 129$$

$$G = (3,321928 \log_{10} N_A) - 2,954$$

$$G = (3,321928 \log_{10} 129) - 2,954$$

$$G = 4,06$$

Keterangan:

N_A = Jumlah butiran per satuan luas (mm^{-2})

f = Faktor pengali *Jeffries* ($M^2/5000$) = 2,0

N_{inside} = Jumlah butiran utuh di dalam area (mm^{-2})

$N_{intercepted}$ = Jumlah butiran *intercept* di dalam area (mm^{-2})

M = Perbesaran mikroskop yang digunakan (100X)

G = Ukuran butir ASTM

4.1.5.2 Perhitungan Diameter Butir Rata-Rata

Perhitungan nilai diameter butir rata-rata menggunakan nilai ukuran butir ASTM yang sudah didapat dan nilai pada Tabel 2.4, lalu dihitung dengan rumus interpolasi.

$$\frac{4,5 - 4,06}{4,5 - 4,0} = \frac{75,5 - d}{75,5 - 89,8}$$

$$\frac{0,44}{0,5} = \frac{75,5 - d}{-14,3}$$

$$-12,584 = 75,5 - d$$

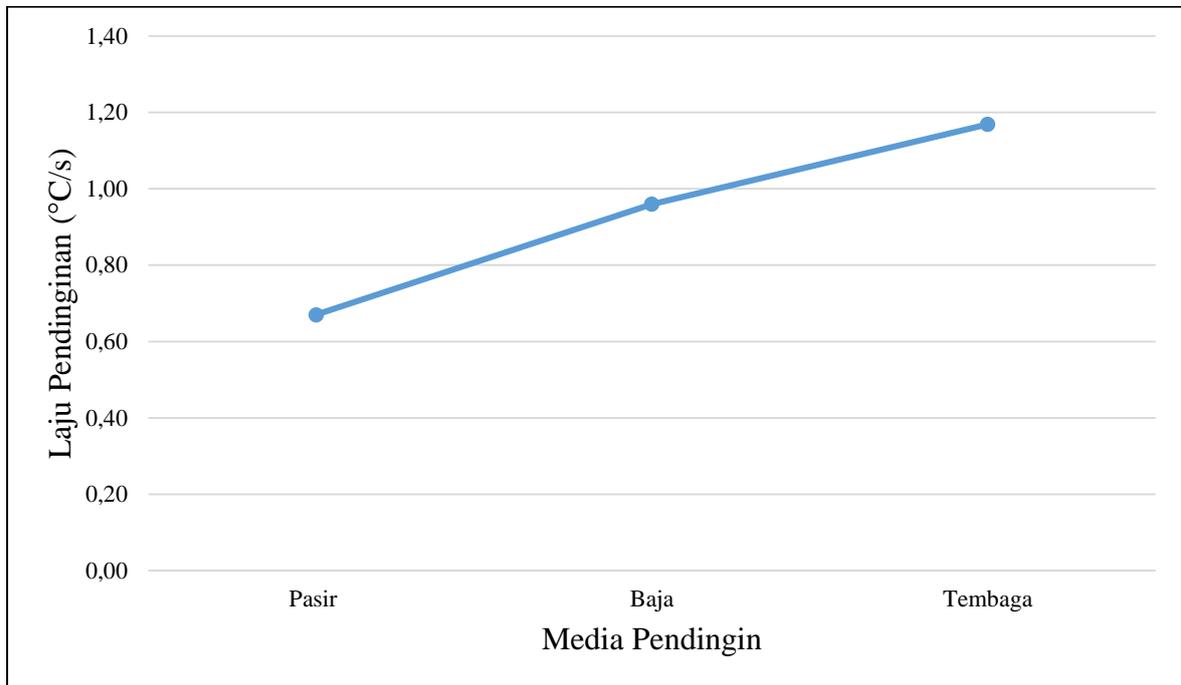
$$d = 88,08 \mu\text{m}$$

Tabel 4.5
Data Hasil Perhitungan Diameter Butir Rata-Rata

Laju Pendinginan (°C/s)	N_{inside}	$N_{intercept}$	N_A	Ukuran Butir ASTM	Diameter Butir Rata-Rata (μm)
0,67 (pasir)	56	17	129	4,06	88,08
0,96 (baja)	57	22	136	4,13	86,08
1,17 (tembaga)	103	26	232	4,90	65,90

4.2 Grafik dan Pembahasan

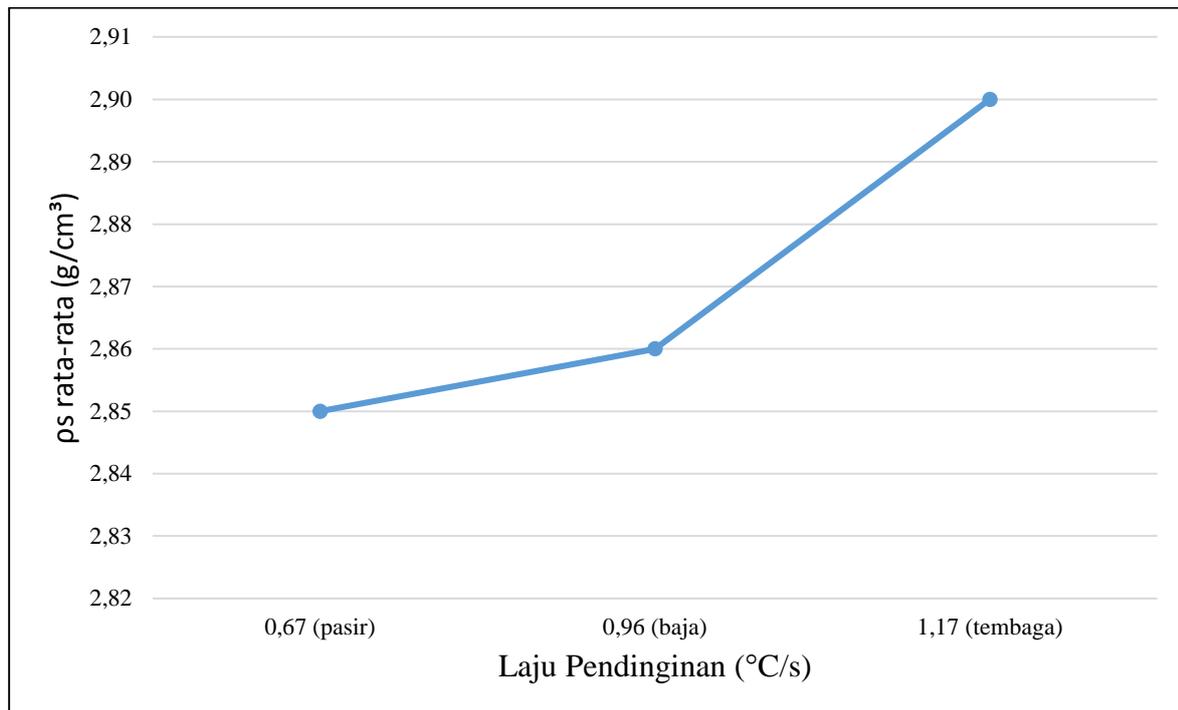
4.2.1 Pengaruh Media Pendinginan Terhadap Laju Pendinginan



Gambar 4.3 Grafik hubungan antara media pendingin terhadap laju pendinginan

Berdasarkan Gambar 4.3 dapat disimpulkan bahwa penyisipan media pendingin dibagian alas cetakan akan mempengaruhi laju pendinginan dari produk coran. Media pendingin pasir memiliki nilai laju pendinginan yang paling rendah yaitu sebesar $0,67\text{ }^{\circ}\text{C/s}$, diikuti dengan media pendingin baja dengan laju pendinginan sebesar $0,96\text{ }^{\circ}\text{C/s}$, dan media pendingin tembaga dengan laju pendinginan paling tinggi yaitu sebesar $1,17\text{ }^{\circ}\text{C/s}$. Hal ini dapat terjadi karena media pendingin tembaga memiliki kemampuan menghantarkan panas yang lebih tinggi dibandingkan dengan baja dan pasir, hal ini terlihat dari nilai konduktivitas termalnya. Sehingga selama proses pengecoran dari temperatur penuangan hingga temperatur pembekuan logam berakhir, tembaga lebih mampu menghantarkan panas ke seluruh bagian cetakan yang menyebabkan laju pendinginannya menjadi lebih cepat.

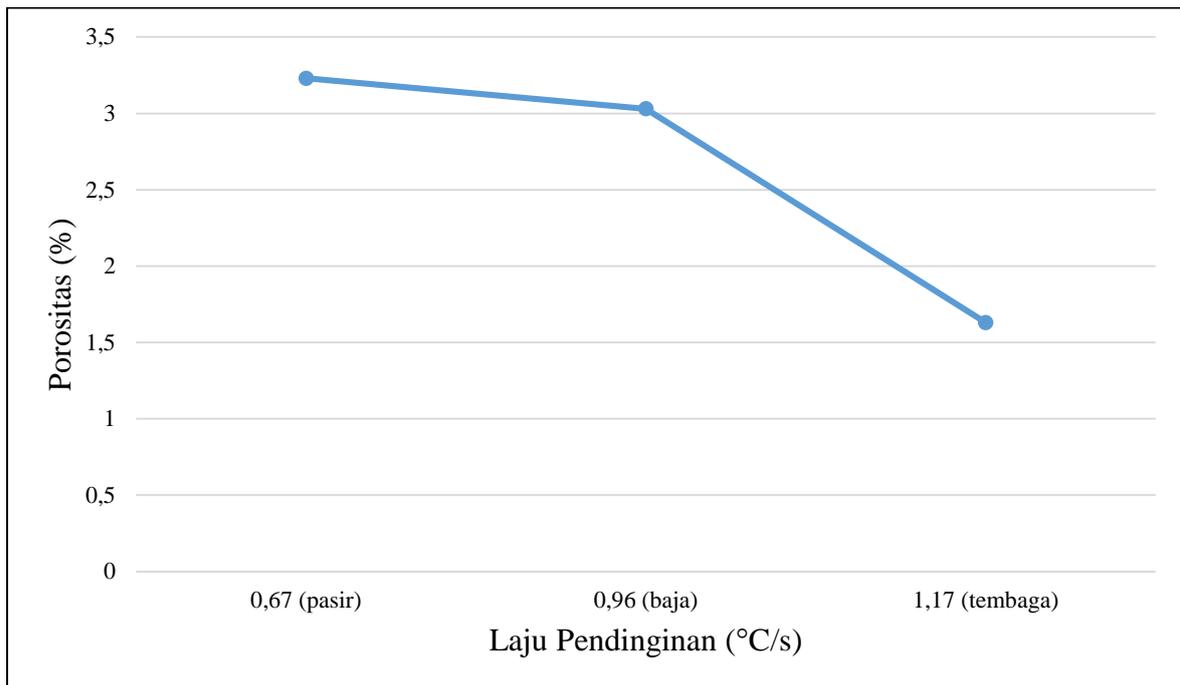
4.2.2 Pengaruh Laju Pendinginan Terhadap Massa Jenis



Gambar 4.4 Grafik hubungan antara laju pendinginan terhadap massa jenis

Gambar 4.4 merupakan grafik hubungan antara laju pendinginan terhadap massa jenis rata-rata, dimana nilai massa jenis ini merupakan nilai *apparent density*. Nilai tersebut merupakan nilai rata-rata 3 spesimen dari setiap variasi laju pendinginan. Berdasarkan grafik dapat disimpulkan bahwa semakin cepat laju pendinginan maka massa jenis rata-rata dari produk coran akan semakin besar, dimana massa jenis rata-rata terkecil didapat dari produk coran dengan laju pendinginan 0,67 °C/s (pasir) yaitu sebesar 2,85 g/cm³, kemudian diikuti dengan produk coran dengan laju pendinginan 0,96 °C/s (baja) sebesar 2,86 g/cm³, dan massa jenis rata-rata terbesar didapat pada produk coran dengan laju pendinginan 1,17 °C/s (tembaga) yaitu sebesar 2,90 g/cm³. Hal ini dapat terjadi dikarenakan adanya perbedaan massa jenis logam pada fase cair dan padat, dimana massa jenis logam pada fase cair lebih kecil daripada fase padat. Laju pendinginan yang relatif cepat akan menyebabkan perbedaan massa jenis dari logam cair dan logam padat semakin kecil, dalam prosesnya logam cair tidak memiliki kesempatan untuk membentuk rongga-rongga saat proses solidifikasi berlangsung, karena logam akan cepat berubah fase menjadi padat, sehingga menghasilkan berat jenis yang lebih tinggi dan serempak.

4.2.3 Pengaruh Laju Pendinginan Terhadap Porositas



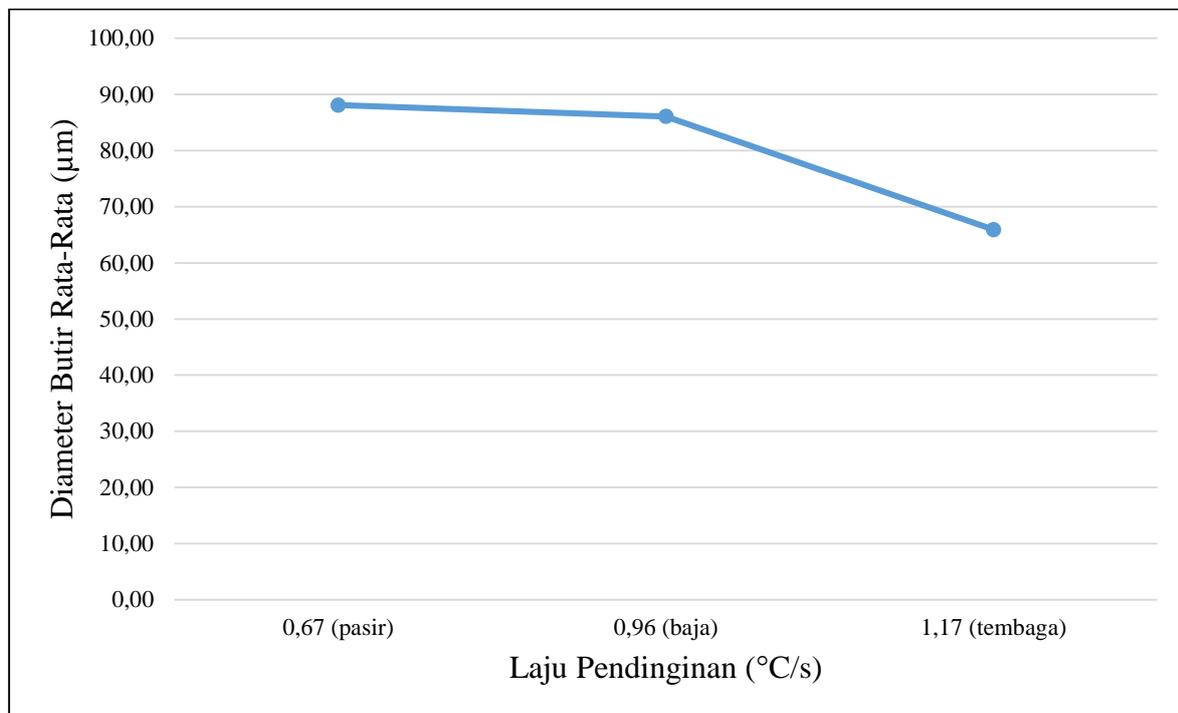
Gambar 4.5 Grafik hubungan antara laju pendinginan terhadap porositas

Persentase porositas produk coran *pulley* didapat dengan membandingkan nilai *apparent density* dengan *theoretical density*. Idealnya kedua nilai massa jenis ini memiliki nilai yang sama, yang berarti tidak terdapat porositas pada produk coran. Namun berdasarkan hasil dari pengujian yang sudah dilakukan, nilai rata-rata *apparent density* memiliki nilai yang lebih kecil daripada *theoretical density*, hal ini menunjukkan bahwa pada produk coran terdapat porositas yang menyebabkan nilai *apparent density* menurun.

Dari gambar 4.5 dapat disimpulkan bahwa semakin cepat laju pendinginan maka porositas yang terdapat pada produk coran akan semakin sedikit, dimana porositas terbesar terdapat pada produk cor dengan laju pendinginan 0,67 °C/s (pasir) yaitu sebesar 3,23%, kemudian diikuti dengan produk coran dengan laju pendinginan 0,96 °C/s (baja) sebesar 3,03%, dan porositas terkecil terdapat pada produk cor dengan laju pendinginan 1,17 °C/s (tembaga) yaitu sebesar 1,63%. Hal ini disebabkan karena pada produk dengan laju pendinginan yang cepat memiliki nilai *apparent density* yang lebih tinggi. Perbedaan nilai *apparent density* dari tiap variasi laju pendinginan disebabkan karena adanya perbedaan massa jenis logam pada fase cair dan padat, dimana massa jenis logam pada fase cair lebih kecil daripada logam pada fase padat. Laju pendinginan yang cepat akan menyebabkan perbedaan massa jenis dari logam cair dan logam padat semakin kecil, dalam hal ini tidak terbentuk rongga-rongga penyusutan didalam produk coran sehingga massa jenis produk

coran akan menjadi semakin besar atau semakin mendekati nilai *theoretical density*nya, Hal ini akan menghasilkan nilai porositas yang lebih kecil karena porositas merupakan perbandingan dari nilai *apparent density* dengan *theoretical density*.

4.2.4 Pengaruh Laju Pendinginan Terhadap Struktur Mikro (Diameter Butir)



Gambar 4.6 Grafik hubungan antara laju pendinginan terhadap diameter butir rata-rata

Berdasarkan Gambar 4.5 diketahui nilai diameter butir rata-rata terbesar ditemui pada sampel dengan laju pendinginan $0,67\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ (pasir) yaitu sebesar $88,08\text{ }\mu\text{m}$, kemudian diikuti dengan sampel dengan laju pendinginan $0,96\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ (baja) sebesar $86,08\text{ }\mu\text{m}$, dan diameter butir rata-rata terkecil ditemui pada sampel dengan laju pendinginan $1,17\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ (tembaga) yaitu sebesar $65,90\text{ }\mu\text{m}$. Sehingga dapat diambil kesimpulan bahwa semakin tinggi laju pendinginan maka diameter butir rata-rata yang dihasilkan akan semakin kecil sedangkan laju pendinginan yang rendah akan menghasilkan diameter butir rata-rata yang semakin besar. Hal ini disebabkan pada laju pendinginan yang tinggi, proses solidifikasi akan berlangsung cepat pula sehingga pertumbuhan butir akan terhambat karena butir sudah terlebih dahulu berubah fase menjadi padat, sehingga butir yang dihasilkan akan lebih banyak dan memiliki diameter yang lebih kecil.

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan dari penelitian yang sudah dilakukan maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Laju pendinginan $0,67\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ (pasir) menghasilkan porositas tertinggi yaitu sebesar 3,23%, kemudian produk coran dengan laju pendinginan $0,96\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ (baja) dengan porositas sebesar 3,03%, dan porositas terkecil terdapat pada produk cor dengan laju pendinginan $1,17\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ (tembaga) sebesar 1,63%. Hal ini disebabkan pada produk dengan laju pendinginan cepat memiliki nilai *apparent density* yang lebih tinggi. Perbedaan nilai *apparent density* disebabkan karena adanya perbedaan massa jenis logam pada fase cair dan padat. Laju pendinginan cepat akan menyebabkan perbedaan massa jenis dari logam cair dan logam padat semakin kecil, dalam hal ini tidak terbentuk rongga-rongga penyusutan didalam produk coran sehingga massa jenisnya akan menjadi semakin besar atau semakin mendekati nilai *theoretical density*-nya. Hal ini akan menghasilkan nilai porositas yang lebih kecil karena porositas merupakan perbandingan dari nilai *apparent density* dengan *theoretical density*.
2. Laju pendinginan $0,67\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ (pasir) memiliki diameter butir rata-rata terbesar dengan $88,08\text{ }\mu\text{m}$, diikuti sampel laju pendinginan $0,96\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ (baja) sebesar $86,08\text{ }\mu\text{m}$, dan diameter butir rata-rata terkecil ditemui pada sampel dengan laju pendinginan $1,17\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ (tembaga) sebesar $65,90\text{ }\mu\text{m}$. Hal ini disebabkan pada laju pendinginanyang cepat, proses solidifikasi akan berlangsung cepat pula, sehingga pertumbuhan butir akan terhambat karena butir sudah terlebih dahulu berubah fase menjadi padat, sehingga butir yang dihasilkan akan lebih banyak dan memiliki diameter yang lebih kecil.

5.2 Saran

1. Diperlukan penelitian lebih lanjut mengenai proses pengecoran logam dengan menggunakan metode *chill casting*, yaitu dengan memvariasikan letak media pendingin yang akan digunakan terhadap struktur mikro yang dihasilkan pada tiap bagiannya.

2. Sebaiknya saat proses pengecoran logam berlangsung hal-hal yang dapat mempengaruhi hasil produk cor dapat dihindarkan, sehingga produk coran yang dihasilkan bisa sesuai dengan metode yang sudah ditetapkan di awal.



DAFTAR PUSTAKA

- Askeland, D. R., Fulay, P. P., dan Bhattacharya, D. K. (2010). *Essentials of Materials and Engineering Second Edition*. USA.
- ASM International. (2004). *ASM Handbook Volume 9: Metallography and Microstructures*. Ohio: ASM International.
- ASTM Standard B 311 – 93. (2002). *Test Method for Density Determination for Powder Metallurgy (P/M) Materials Containing Less Than Two Percent Porosity*. Philadelphia: ASTM International.
- ASTM Standard D 2734 – 94. (1994). *Standard Test Methods for Void Content of Reinforced Plastics*. Philadelphia: ASTM International.
- ASTM Standard E 112 – 96. (2004). *Standard Test Method for Determining Average Grain Size*. Philadelphia: ASTM International.
- Avner, Sidney H. (1974). *Introduction to Physical Metallurgy*. New York: McGraw Hill.
- Beeley, P. (1972). "Foundry Technology". New Delhi : Butterworth-Heinemann.
- Callister, William D., & Rethwisch, David G. (2009). *Materials Science And Engineering An Introduction 8th Edition*. USA. John Wiley & Sons, Inc.
- Campbell, John. (2003). *Castings*. Cornwall: MPG Books Ltd
- DeGarmo, E. Paul., Black, J T., dan Kohser, Ronald A. (2008). *Materials & Processes in Manufacturing 10th Edition*. USA. John Wiley & Sons, Inc.
- Grace Matthews, Inc. (2014). *The Changing Face of the Aluminum Component Industry*.
- Groover, Mikell P. (2010). *Fundamentals of Modern Manufacturing Materials, Processes, and Systems 4th Edition*. USA. John Wiley & Sons, Inc.
- Ingulstad, M., Storli, E., dan Gendron, R. S. (2014). *Introduction. Opening Pandora's bauxite. A raw materials perspective on globalization processes in the twentieth century. BASICS OF THE GLOBAL ALUMINIUM MARKET*. Vancouver: University of British Columbia Press.
- Kalpakjian, Serope. (2009). *Manufacturing, Engineering, and Technology SI 6th Edition*. London. Prentice Hall.
- Kaufman, John Gilbert., dan Rooy, Elwin L. (2004). *Aluminium Alloy Castings Properties, Processes, and Applications*. USA. ASM International.
- Laboratorium Pengecoran Logam Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya. (2017).

- Nurkholiq, Muhammad Syaiful., Purwanto, Helmy., dan Respati, Sri M. B. (2013). *Analisa Pengaruh Variasi Tekanan Pada Pengecoran Squeeze Terhadap Kekerasan Produk Sepatu Kampas Rem Dengan Bahan Aluminium (Al) Silikon (Si) Daur Ulang*. Semarang. Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Wahid Hasyim.
- Pusat Data dan Informasi Energi dan Sumber Daya Mineral Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2012). *Kajian Supply Demand Mineral*.
- Raharjo, S., Abdillah, F., dan Wanto, Y. (2011). *Analisa Pengaruh Pengecoran Ulang Terhadap Sifat Mekanik Paduan Alumunium ADC 12*. Semarang. Fakultas Teknik Universitas Wahid Hasyim.
- Suprpto, Wahyono. (2011). Porositas Gas pada Material Duralumin dalam Pengecoran Sistem Vakum. *Disertasi*. Tidak dipublikasikan. Depok: Universitas Indonesia.
- Suprpto, Wahyono. (2017). *Teknologi Pengecoran Logam*. Malang. UB Press.
- Supriyanto. (2009). *Analisis Hasil Pengecoran Aluminium Dengan Variasi Media Pendinginan*. Yogyakarta. Teknik Mesin Universitas Janabadra.
- Surdia, Tata & Chijiwa, Kanji. (1996). *Teknik Pengecoran Logam*. Jakarta: Pradyna Paramita
- Wijaya, M. T., Zubaidi, dan Wijoyo. (2017). *Pengaruh Variasi Temperatur Tuang Terhadap Ketangguhan Impak dan Struktur Mikro Pada Pengecoran Aluminium*. Surakarta. Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri.